Statisches und dynamisches Verhalten eines fünfachsigen Bearbeitungszentrums

- Berechnung der 4. Entwurfs -

Dr.-Ing. Rouven Meidlinger

planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Ausblick

© planlauf GmbH

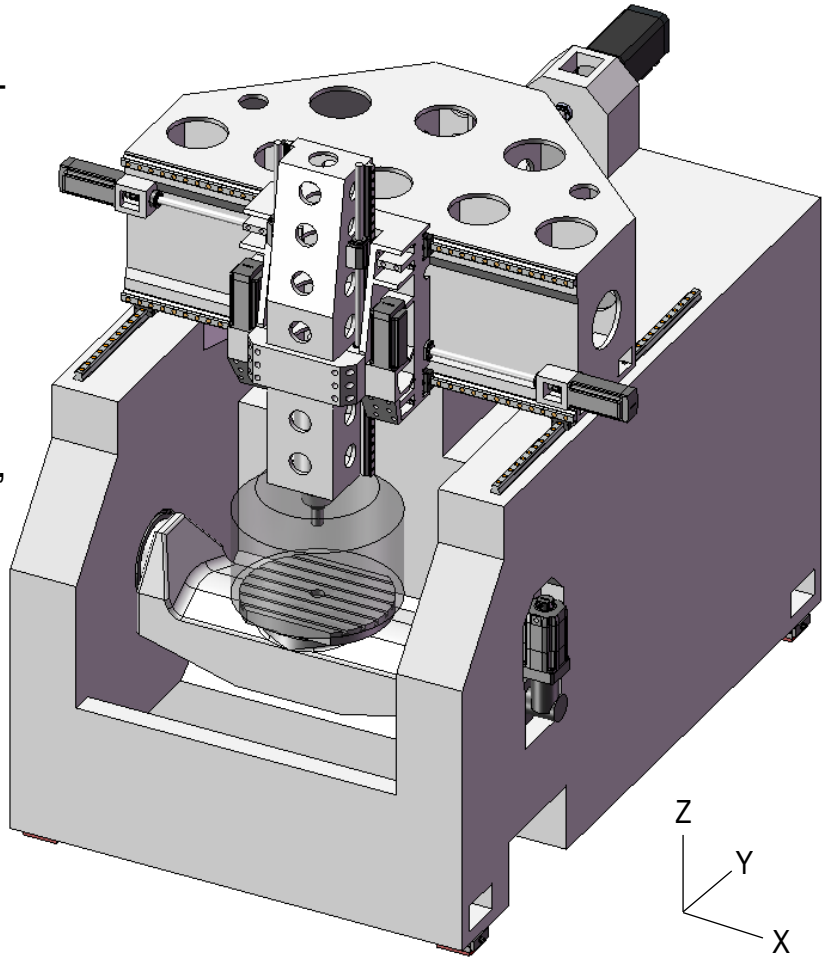
Einleitung und Aufgabenstellung

Einleitung

- Der Auftraggeber entwickelt derzeit ein 5-achsiges Bearbeitungszentrum mit einem Arbeitsraum von X/Y/Z = 1000/1000/700 mm³ für die Bearbeitung von Stahl, Guss und Titan.
- Die Zielsteifigkeit in der Arbeitsraummitte liegt bei 20 N/µm relativ zwischen Werkzeug und Werkstück. Die maximale dynamische Nachgiebigkeit sollte im Frequenzbereich von 0 bis 400 Hz einen Wert von 0,1 µm/N nicht überschreiten.
- Die bereits durchgeführten Variantenrechnungen haben ergeben, dass der vierte Entwurf den Anforderungen entspricht.

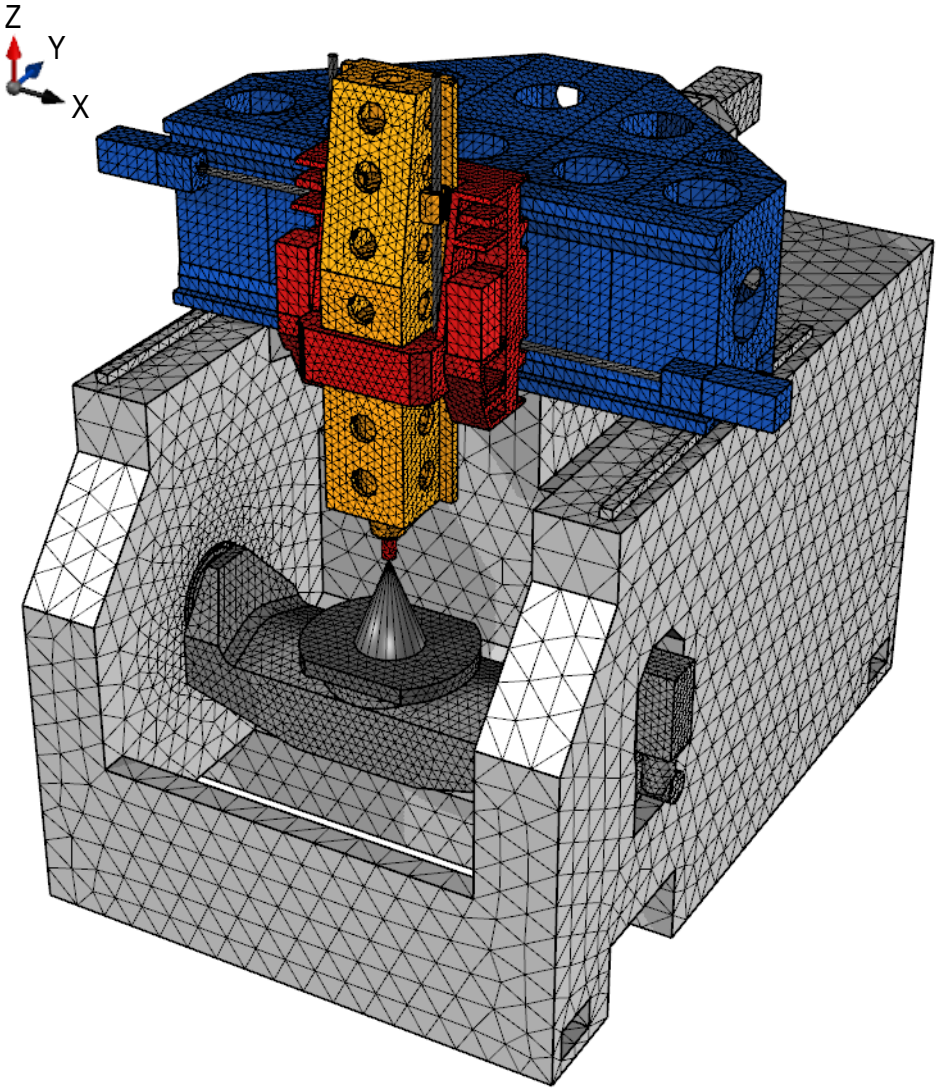
Aufgabenstellung

- Abschließende Berechnung des statischen und dynamischen Verhaltens des endgültigen Konstruktionsstands



© planlauf GmbH

Aufbau des Finite-Elemente-Modells



- Führungen
  - X-Achse: INA RUE 45 E (4 Wagen / 2 Schienen)
  - Y-Achse: INA RUE 45 E (5 Wagen / 3 Schienen)
  - Z-Achse: INA RUE 35 E (4 Wagen / 2 Schienen)
- Kugelgewindespindeln:
  - X-Achse: 2x ∅32x20 mit INA ZKLF 2068
  - Y-Achse: ∅50x20 mit INA ZKLF 3080
  - Z-Achse: 2x ∅32x20 mit INA ZKLN 2052
- Hauptspindel (/\ M w/\)
  - Vorne und hinten: jeweils 2x B7014E.UL
  - Werkzeug: ∅50x80
- A-Achse: 2x INA YRT 260 mit Klemmung, elektrisch verspannter Ritzelantrieb
- C-Achse: INA YRT 260 mit Klemmung, Torquemotor
- Werkstoffe
  - Bett: Mineralguss
  - X-/Y-Schlitten: EN-GJL-300
  - Z-Schlitten, Brücke: EN-GJS-400
  - Tisch, Z-KGT-Festlagerkonsole: EN-GJL-250
  - alle anderen Bauteile: Stahl
- Verankerte 4-Punkt-Aufstellung

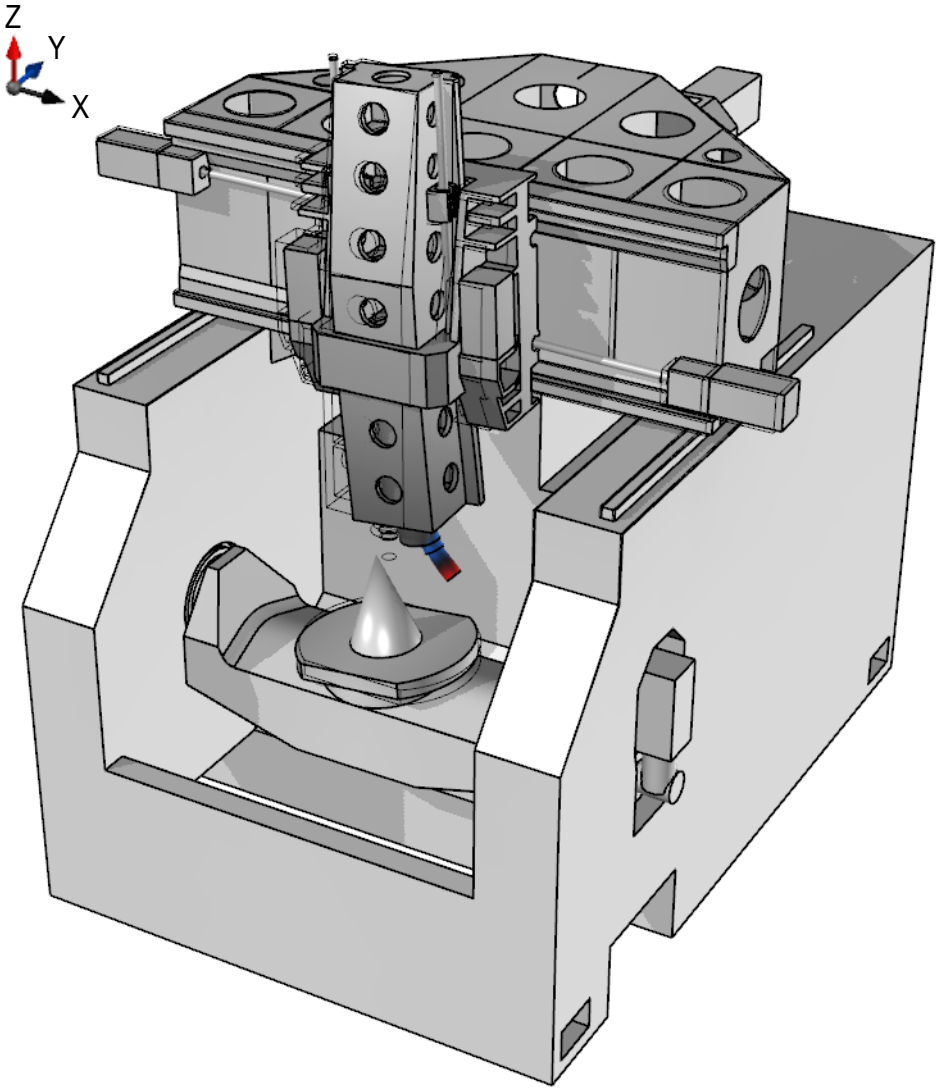
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten – *Steifigkeiten und Schwachstellenanalyse*
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Ausblick

© planlauf GmbH

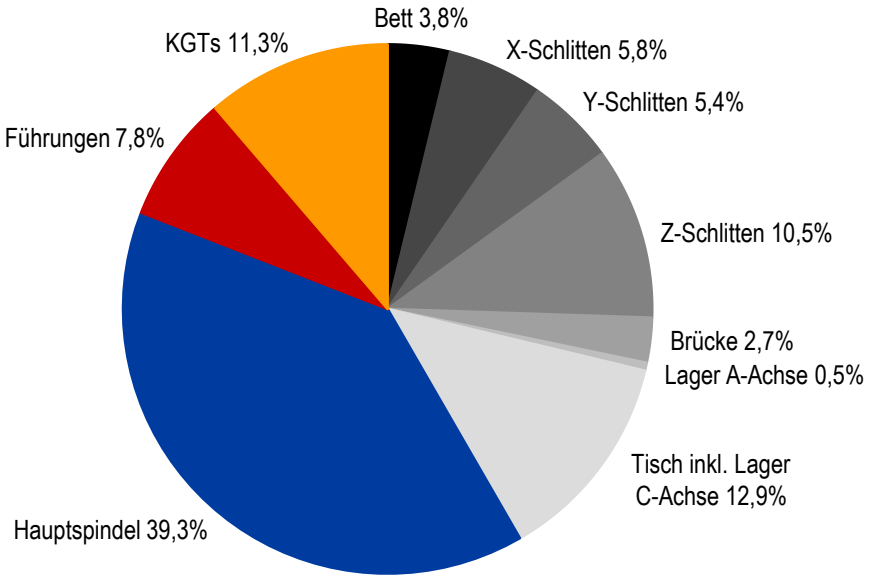
Statische Belastung in X-Richtung (X0 Y0 Z0, Mitte)



Statische Steifigkeit in X-Richtung
$k_{XX,REL}$ = 21,5 N/µm

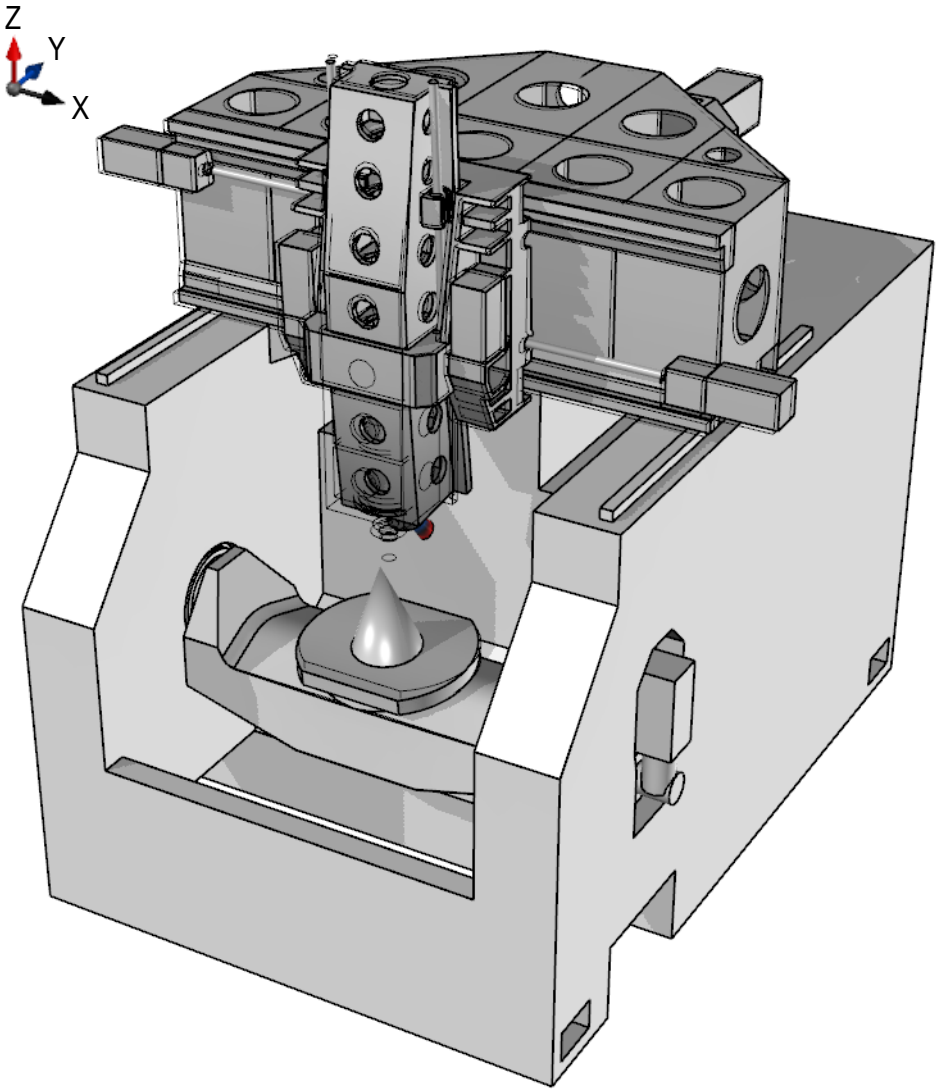
$k_{XX,WZG}$ = 25,8 N/µm
$k_{XX,WST}$ = 128,3 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

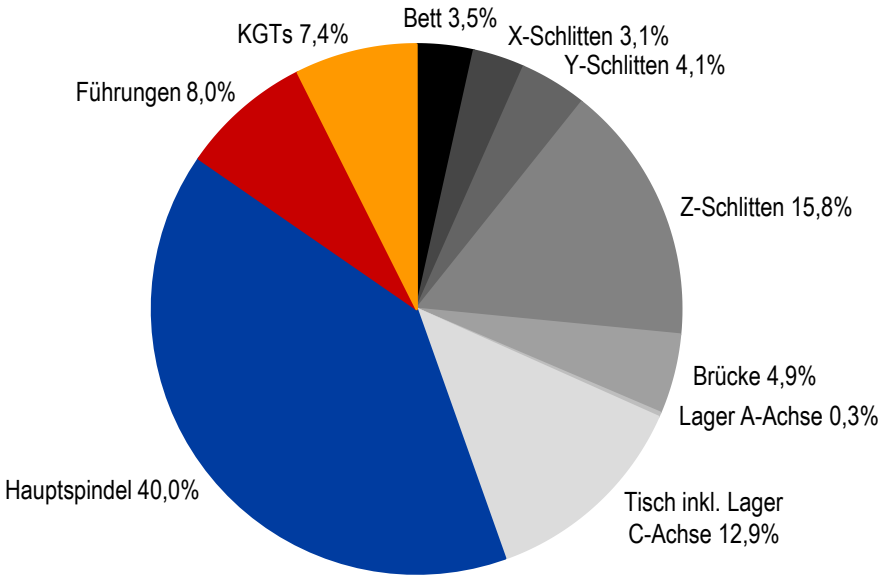
Statische Belastung in Y-Richtung (X0 Y0 Z0, Mitte)



Statische Steifigkeit in Y-Richtung
$k_{YY,REL}$ = 20,6 N/µm

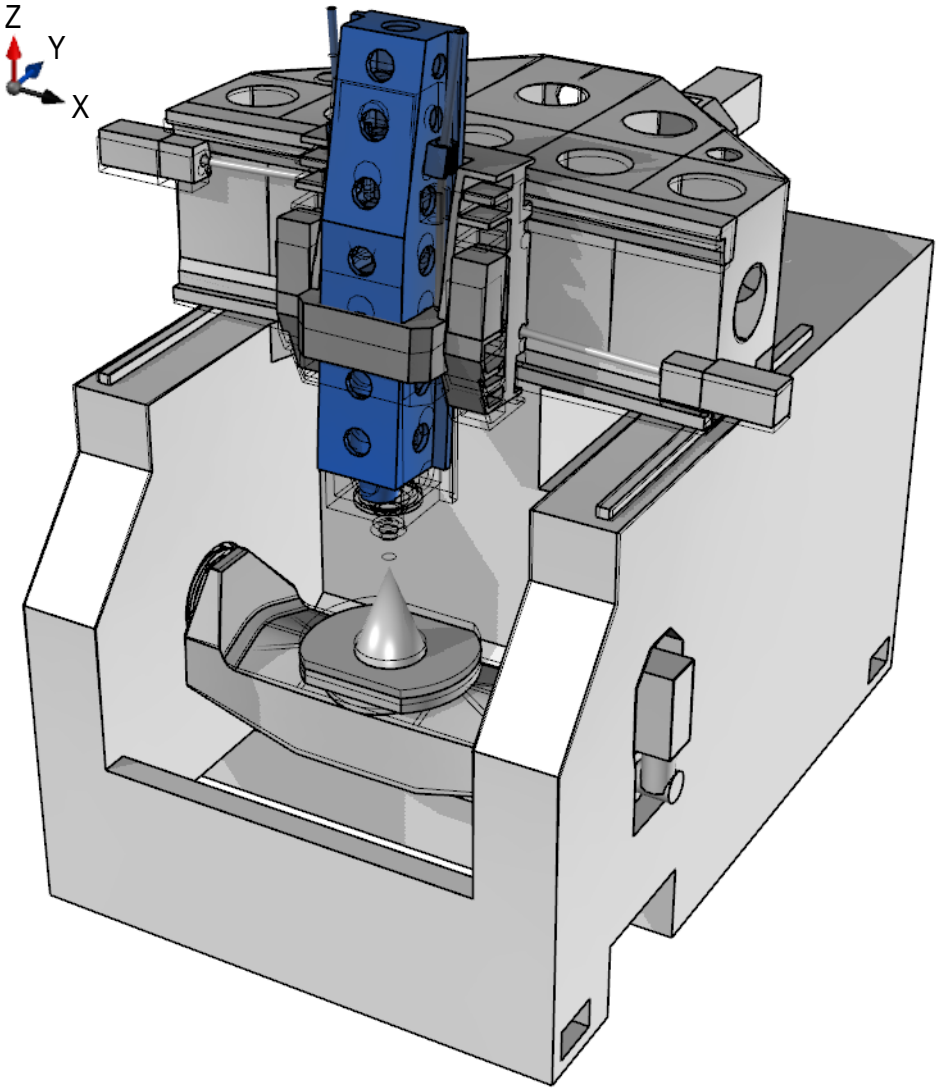
$k_{YY,WZG}$ = 25,3 N/µm
$k_{YY,WST}$ = 110,6 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

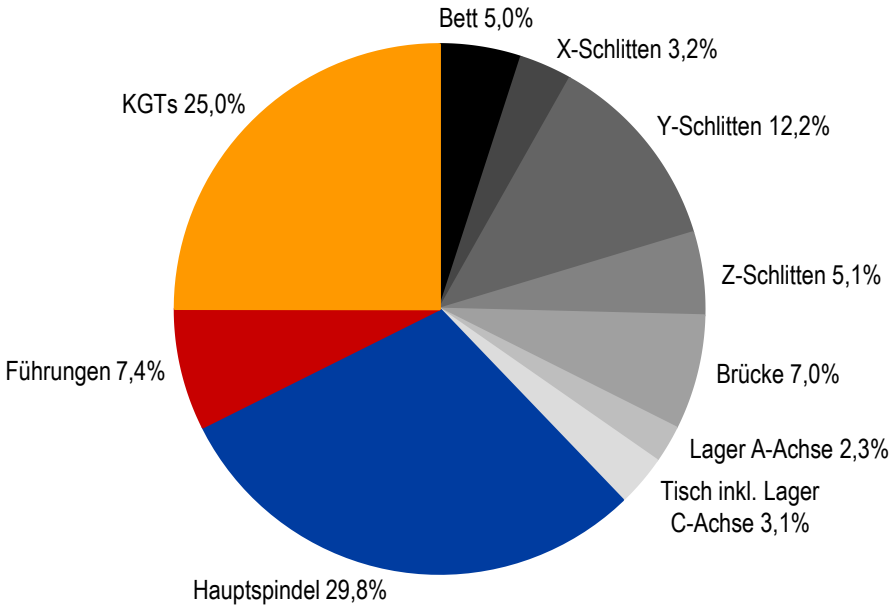
Statische Belastung in Z-Richtung (X0 Y0 Z0, Mitte)



Statische Steifigkeit in Z-Richtung
$k_{ZZ,REL}$ = 96,6 N/µm

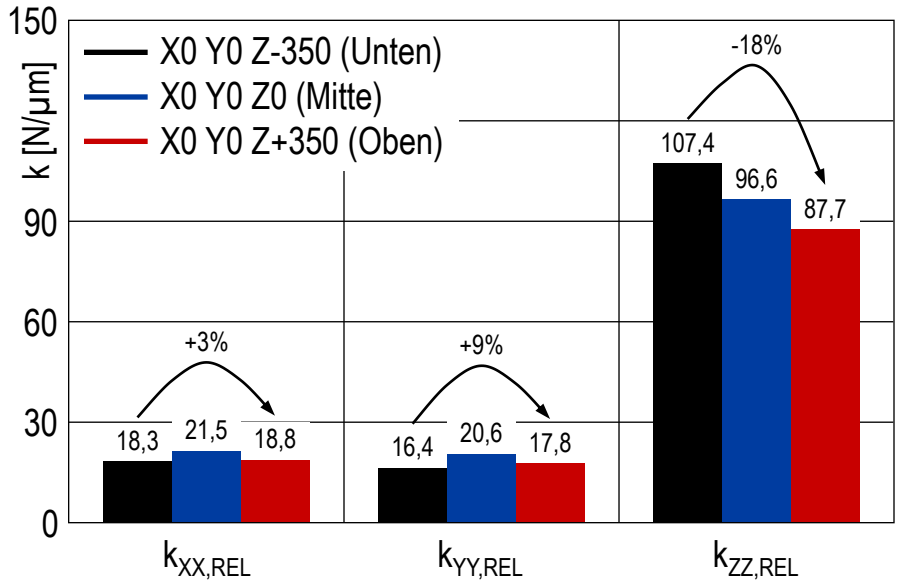
$k_{ZZ,WZG}$ = 110,2 N/µm
$k_{ZZ,WST}$ = 787,1 N/µm

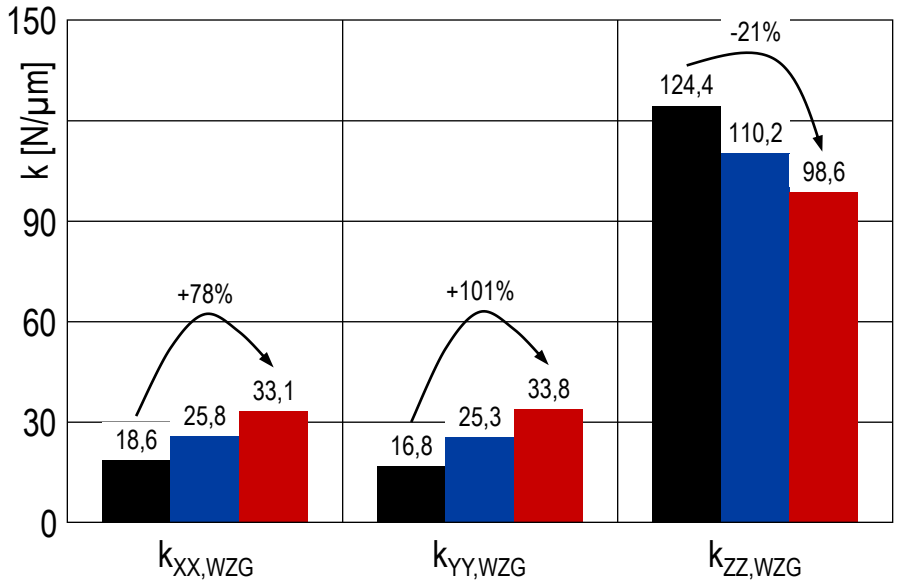
Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung

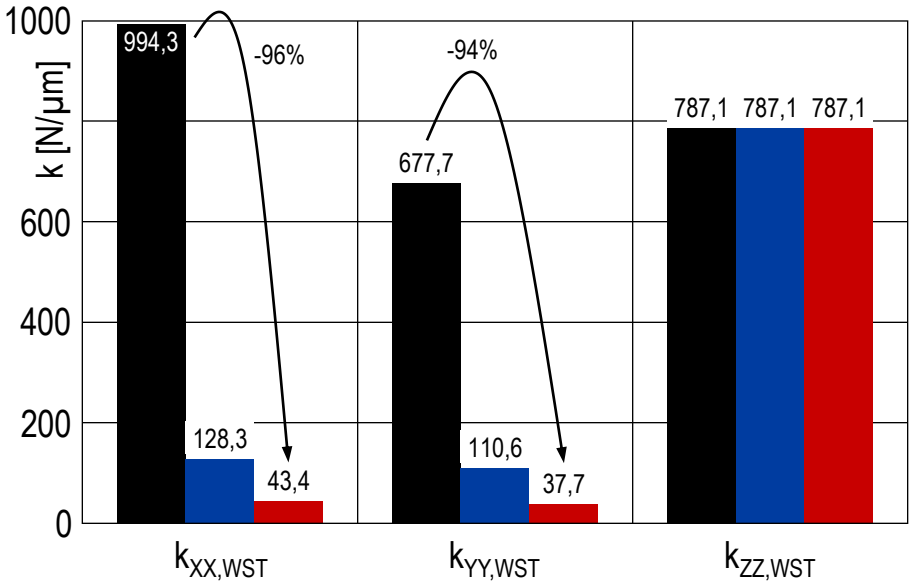


© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten in Abhängigkeit der Z-Position



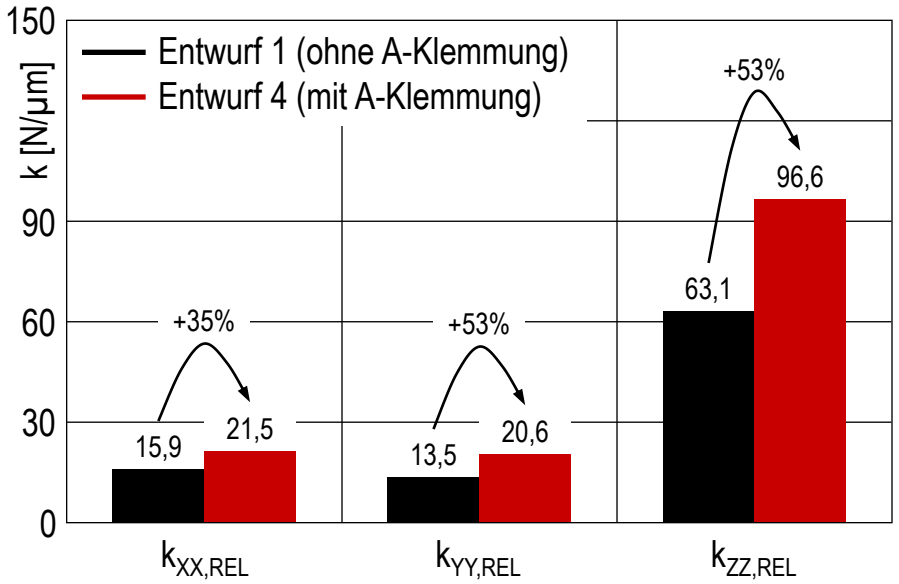


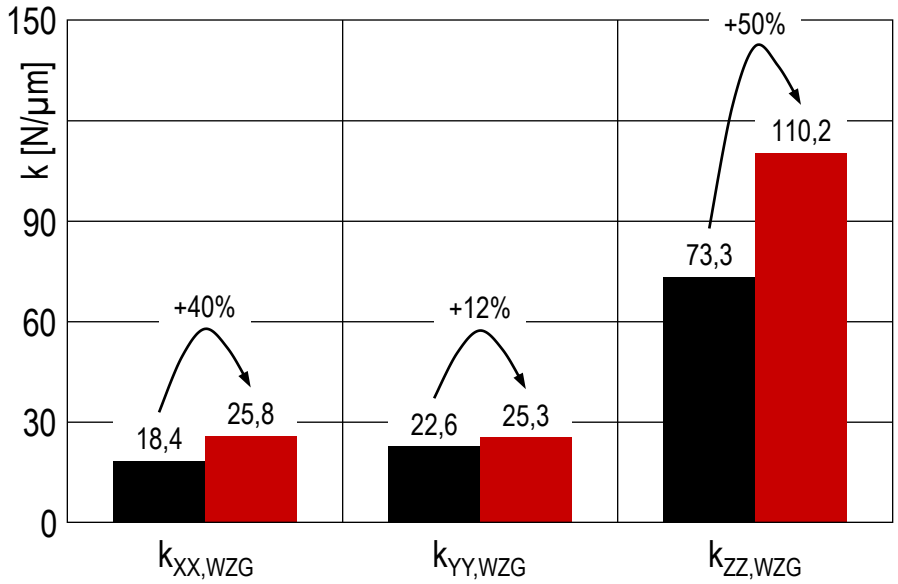


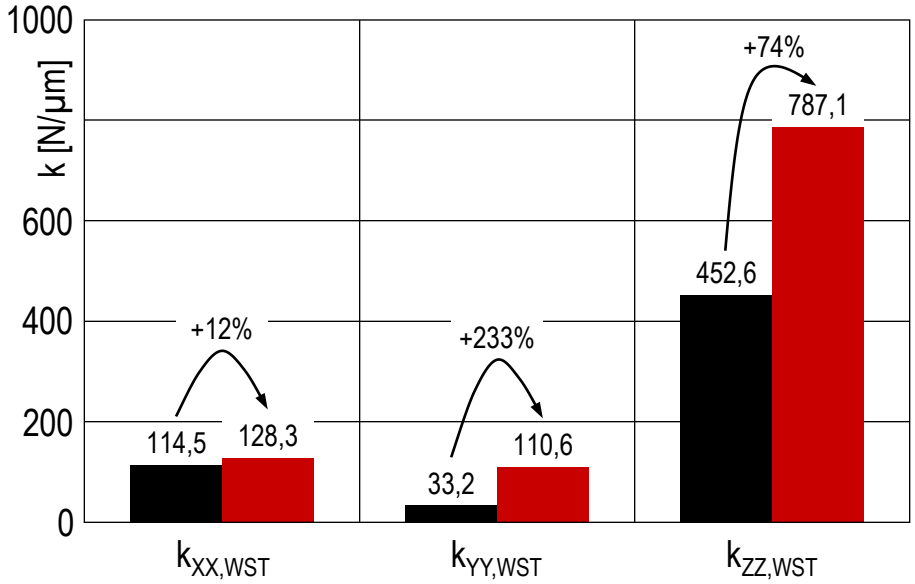
- Die werkzeugseitigen Steifigkeiten steigen mit abnehmender Auskragung des Z-Schlittens in X- und Y-Richtung um 78% bzw. 101% an.
- Die werkstückseitigen Steifigkeiten fallen in der X- und Y-Richtung mit abnehmender Auskragung des Z-Schlittens sehr stark ab. Die Ursache für den Abfall liegt in der begrenzten Steifigkeit des Tischlagers.
- **Die relative Zielsteifigkeit von 20 N/µm in Arbeitsraummitte wird in der X- und Y-Richtung erreicht.**

© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten für die Entwürfe 1 und 4







- Gegenüber dem ersten Entwurf können die werkzeugseitigen Steifigkeiten um 12% bis 50% gesteigert werden (Gantry-Antriebe der X- und der Z-Achse, größerer Querschnitt des Z-Schlittens).
- Die werkstückseitigen Steifigkeiten können durch die Querschnittsvergrößerung und das geschlossene Profil der Brücke sowie die Klemmung der A-Achse zwischen 12% und 223% gesteigert werden.

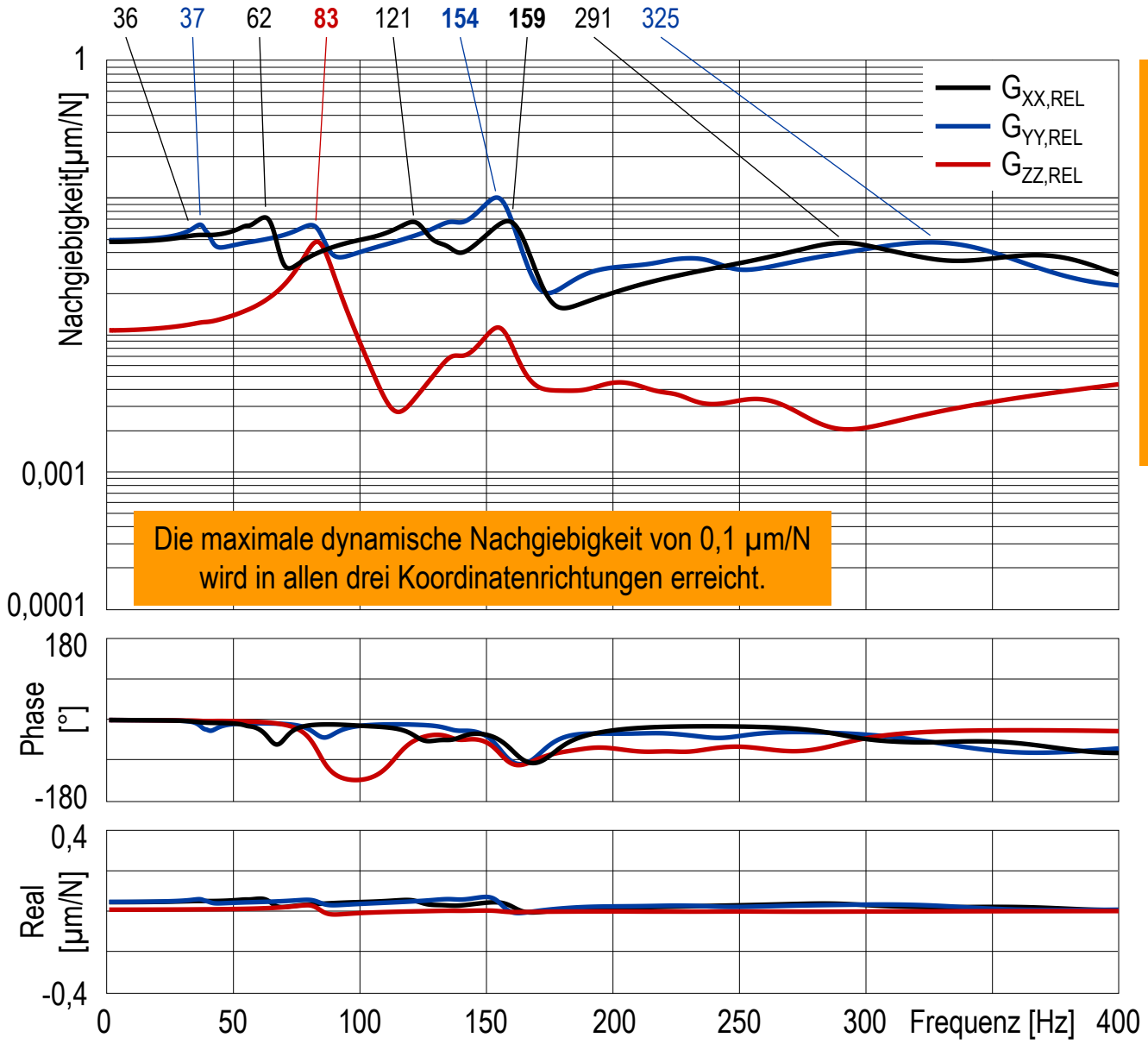
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Frequenzgänge und Schwingungsformen in Arbeitsraummitte*
- Zusammenfassung und Ausblick

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge



Dominante Resonanzfrequenzen

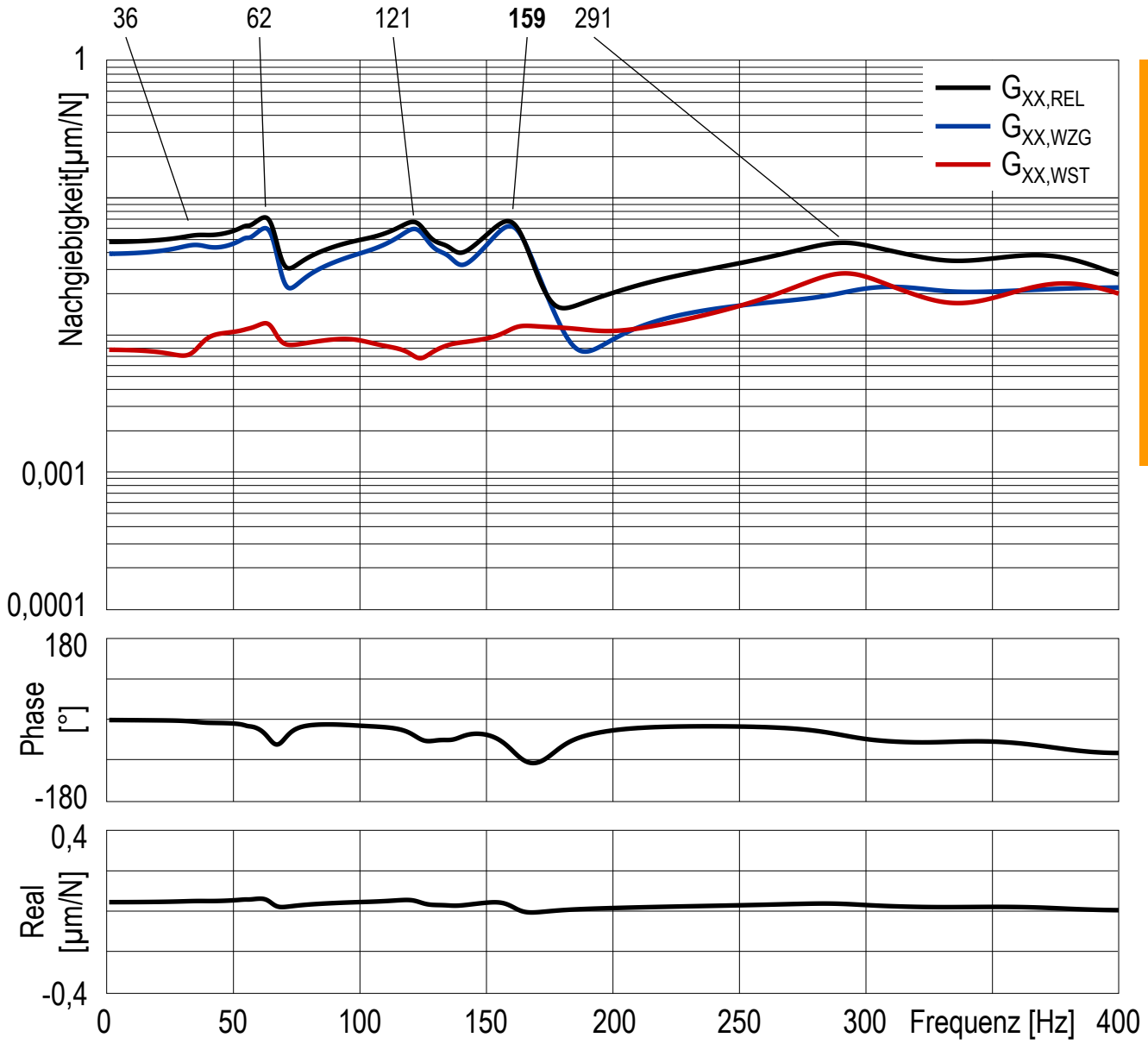
83 Hz
- Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

154 Hz
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

159 Hz
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

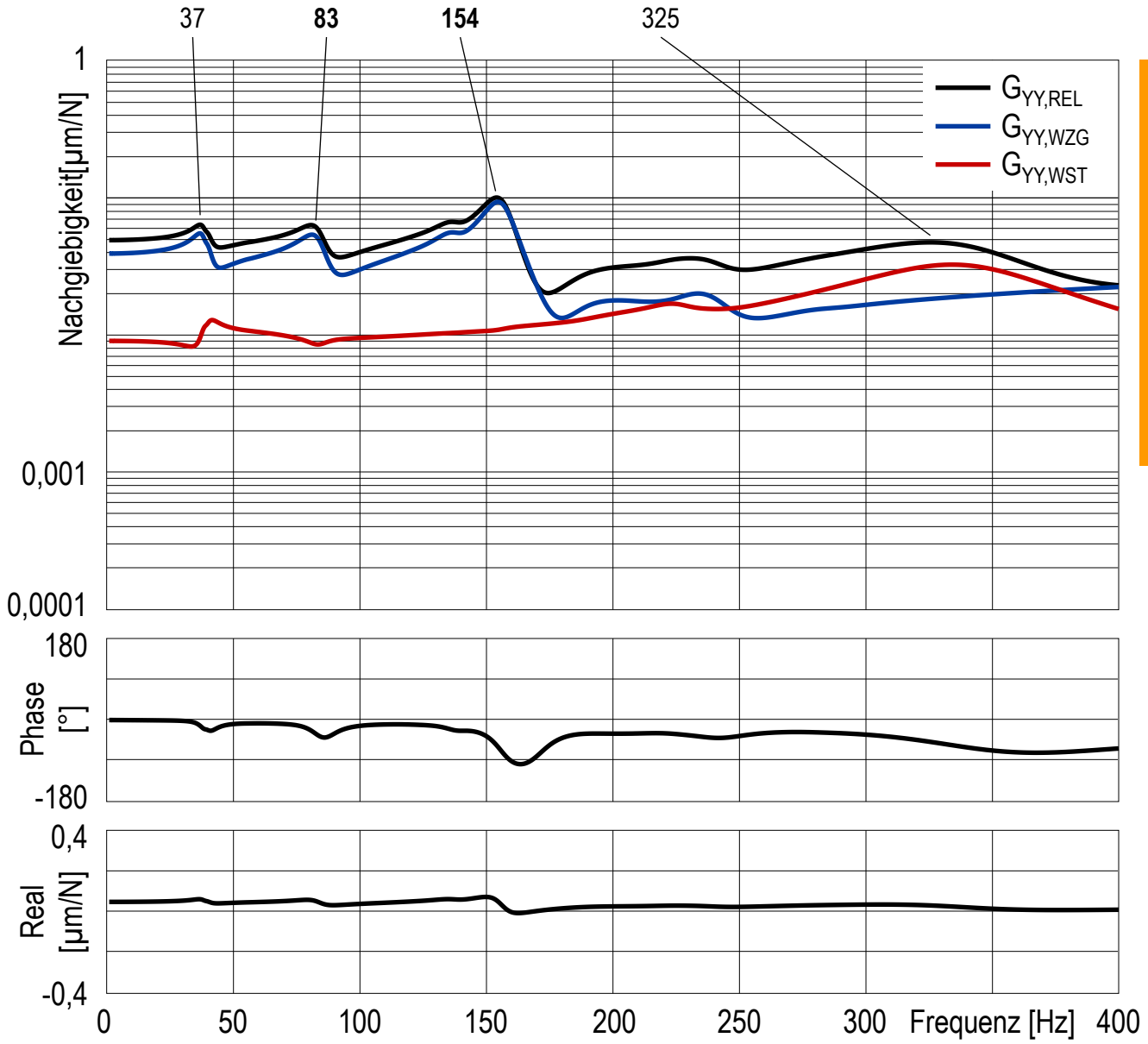
83 Hz
- Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

154 Hz
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

159 Hz
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

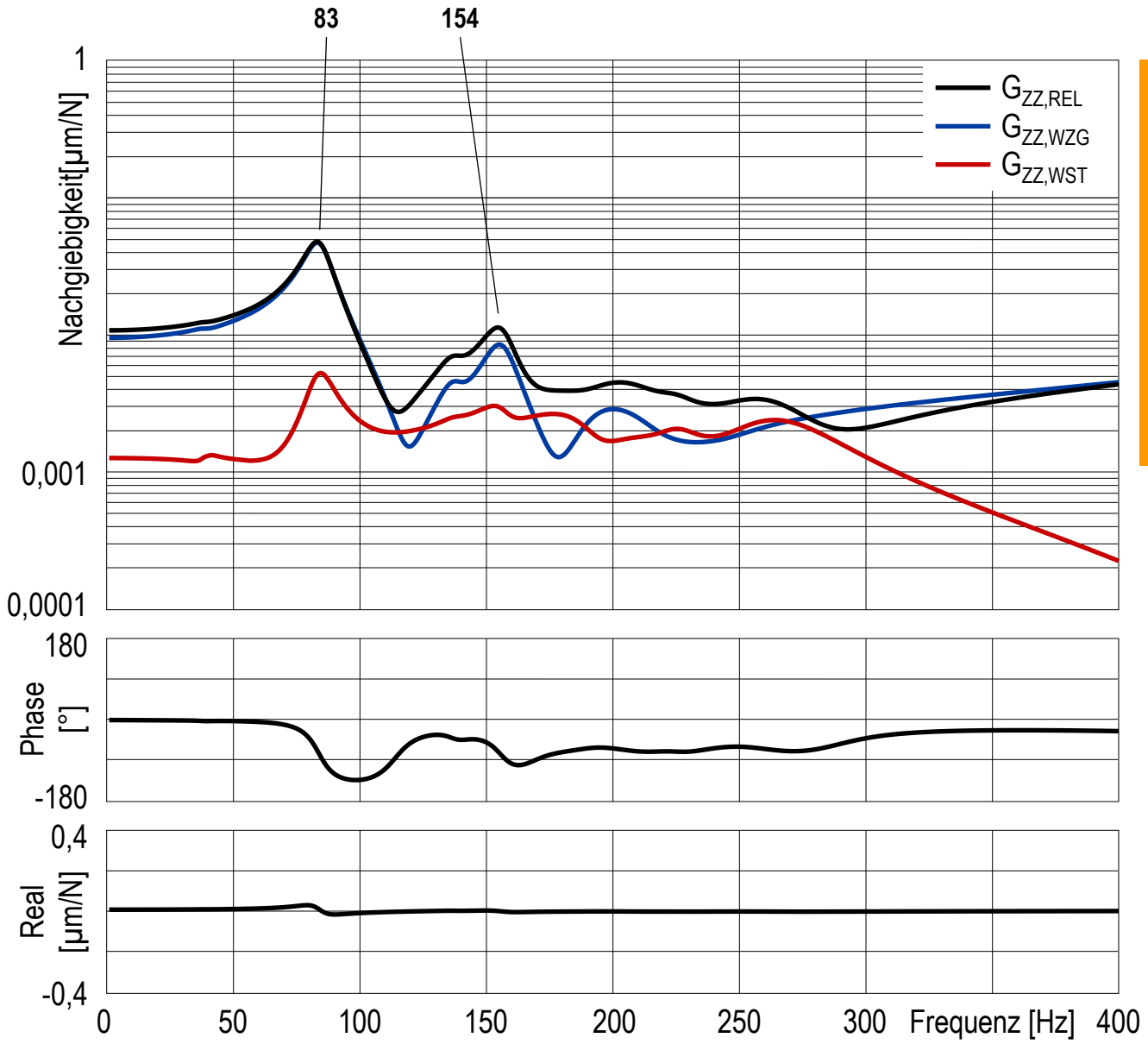
83 Hz
- Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

154 Hz
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

159 Hz
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

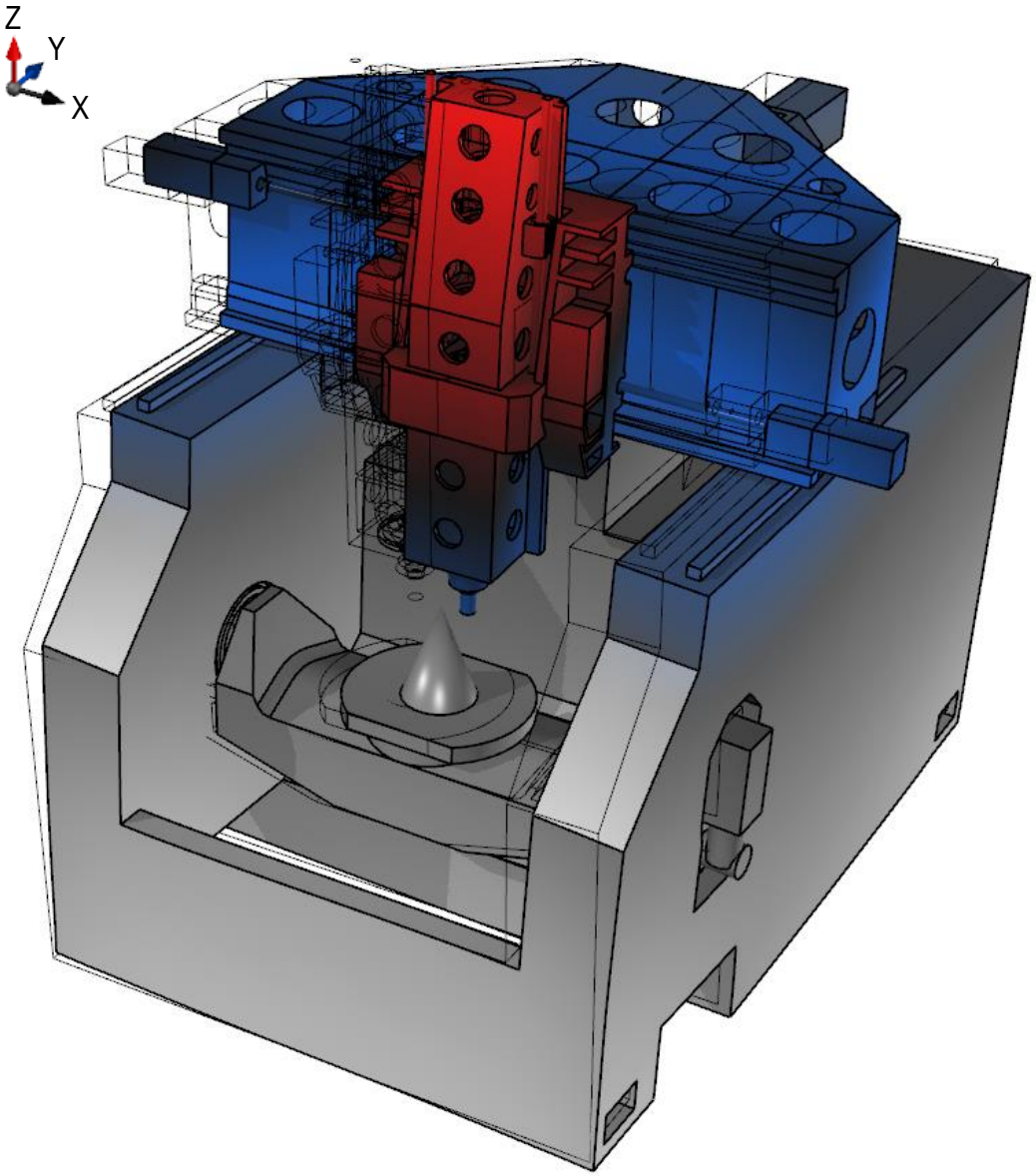
83 Hz
- Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

154 Hz
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

159 Hz
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

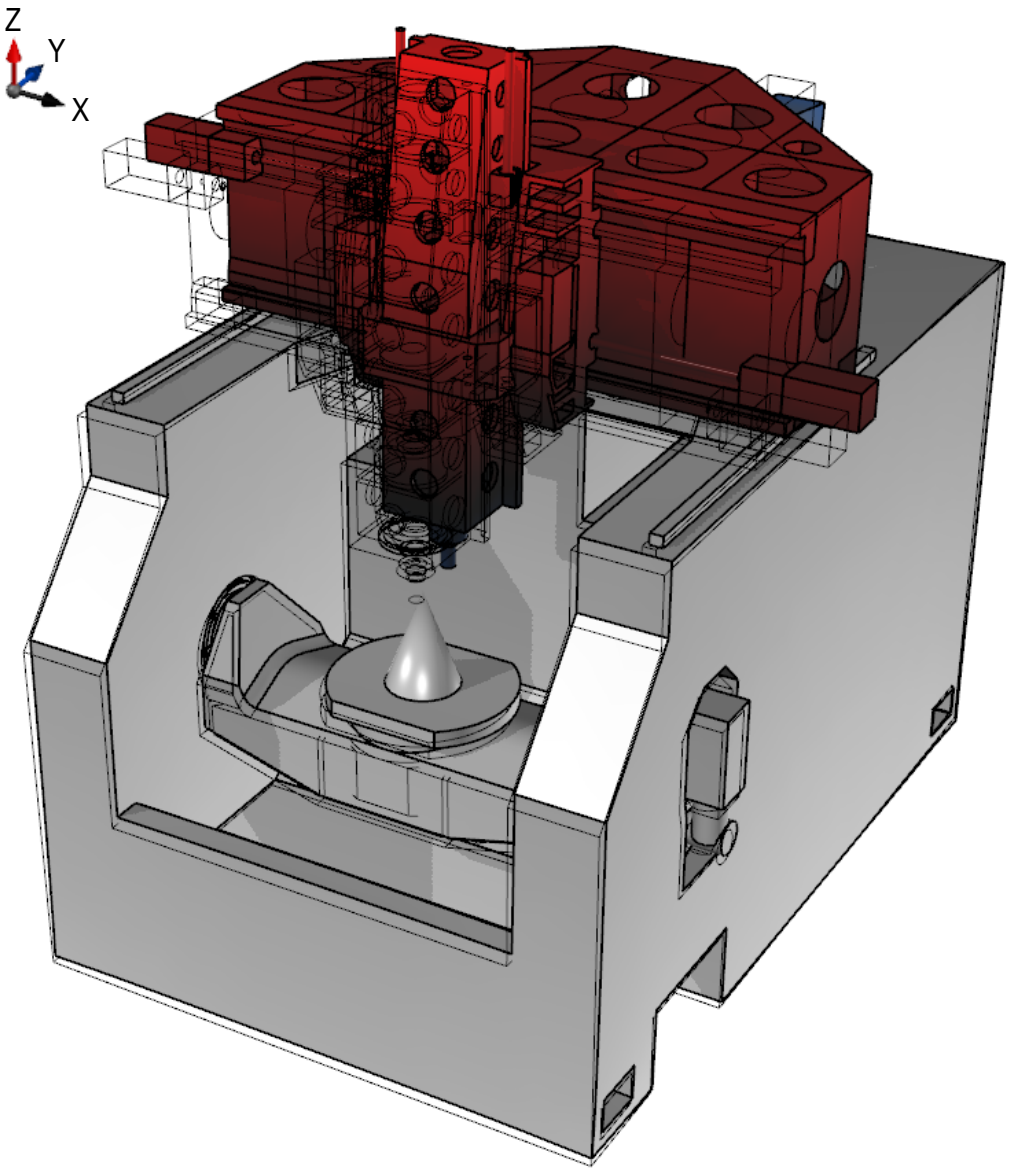
Schwingungsform bei 36 Hz



- Aufstellschwingung in X-Richtung
- Schieben des X-Schlittens

© planlauf GmbH

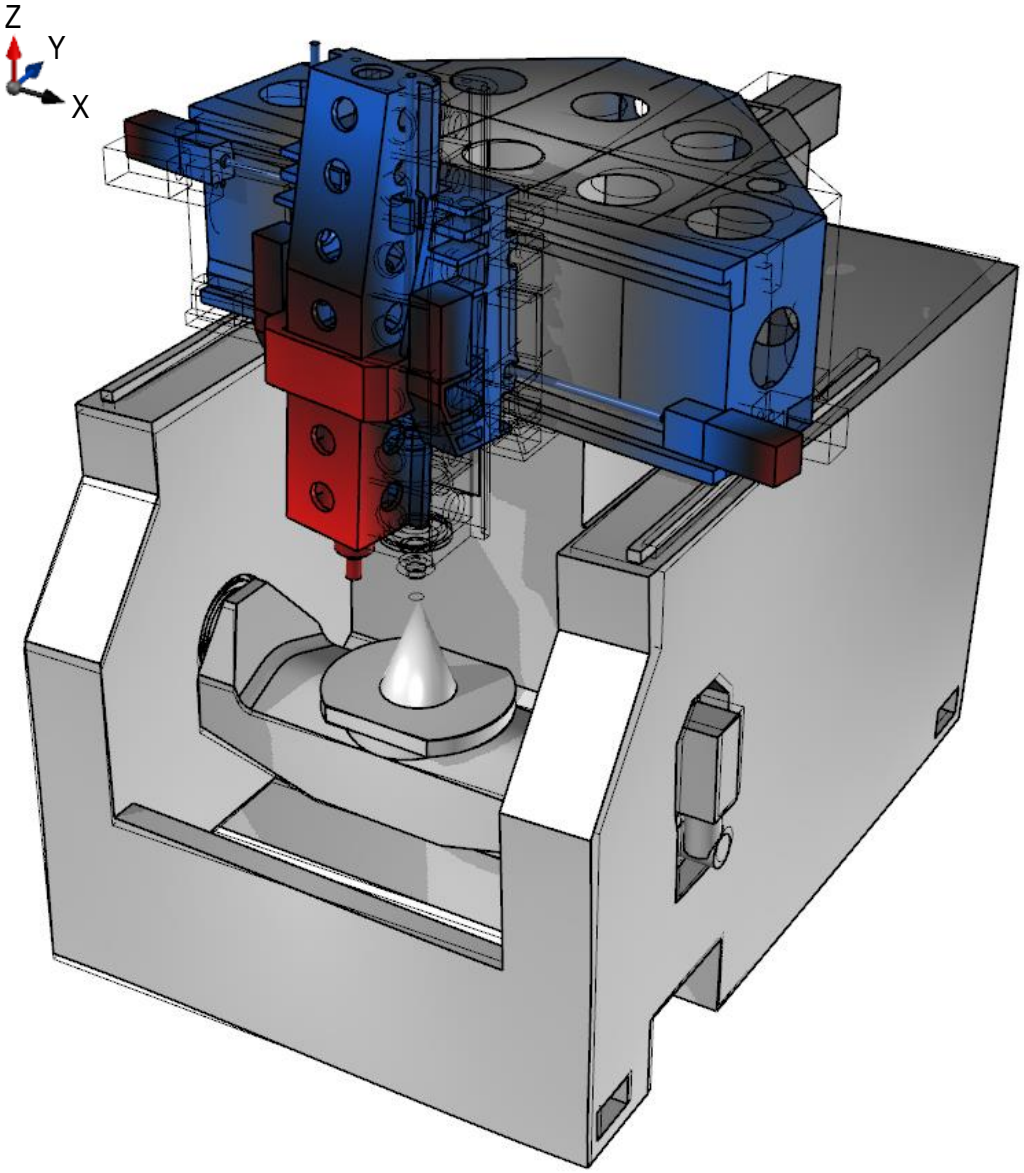
Schwingungsform bei 37 Hz



- Aufstellschwingung in Y-Richtung
- Schieben des Y-Schlittens

© planlauf GmbH

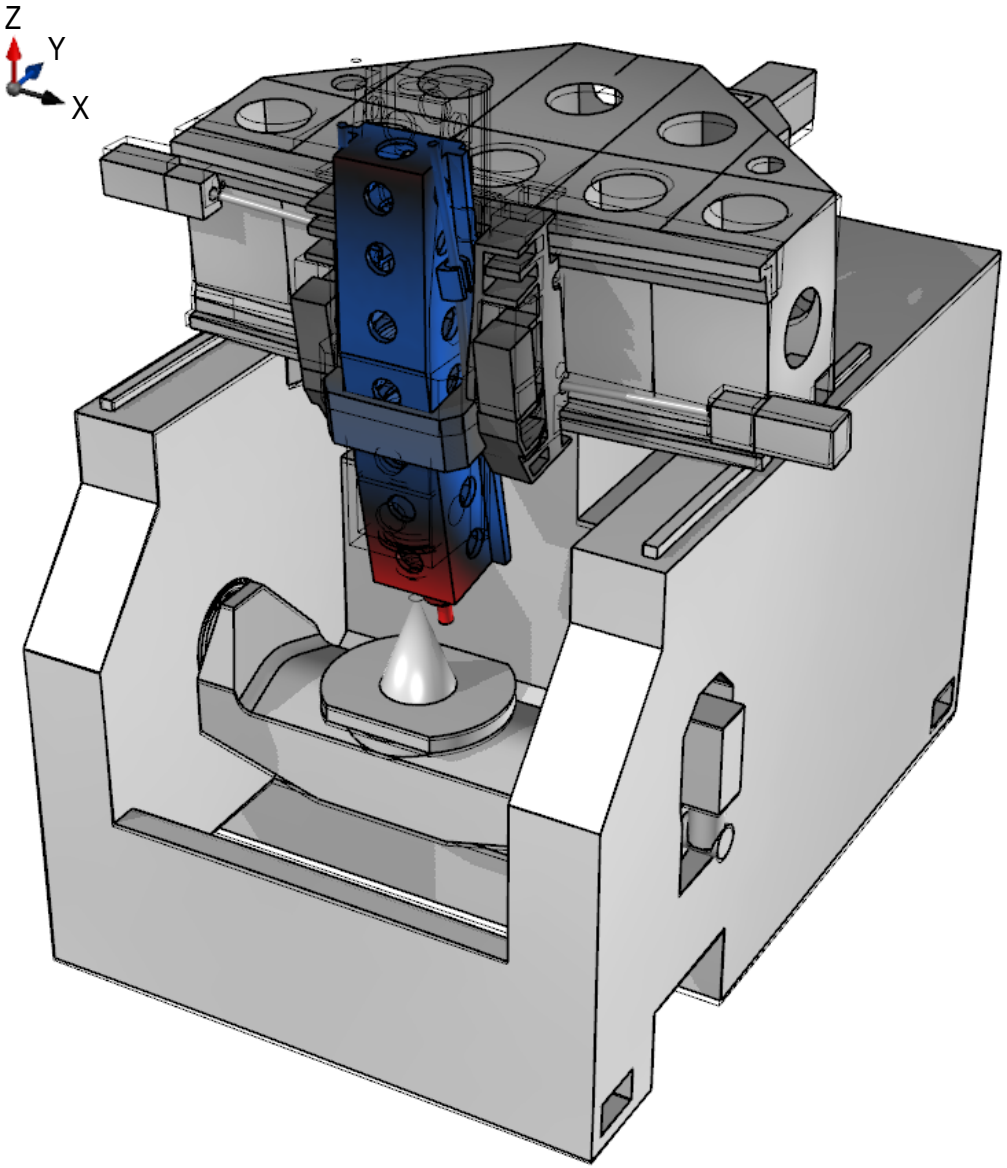
Schwingungsform bei 62 Hz



- Schieben des X-Schlittens
- Gieren des Y-Schlittens

© planlauf GmbH

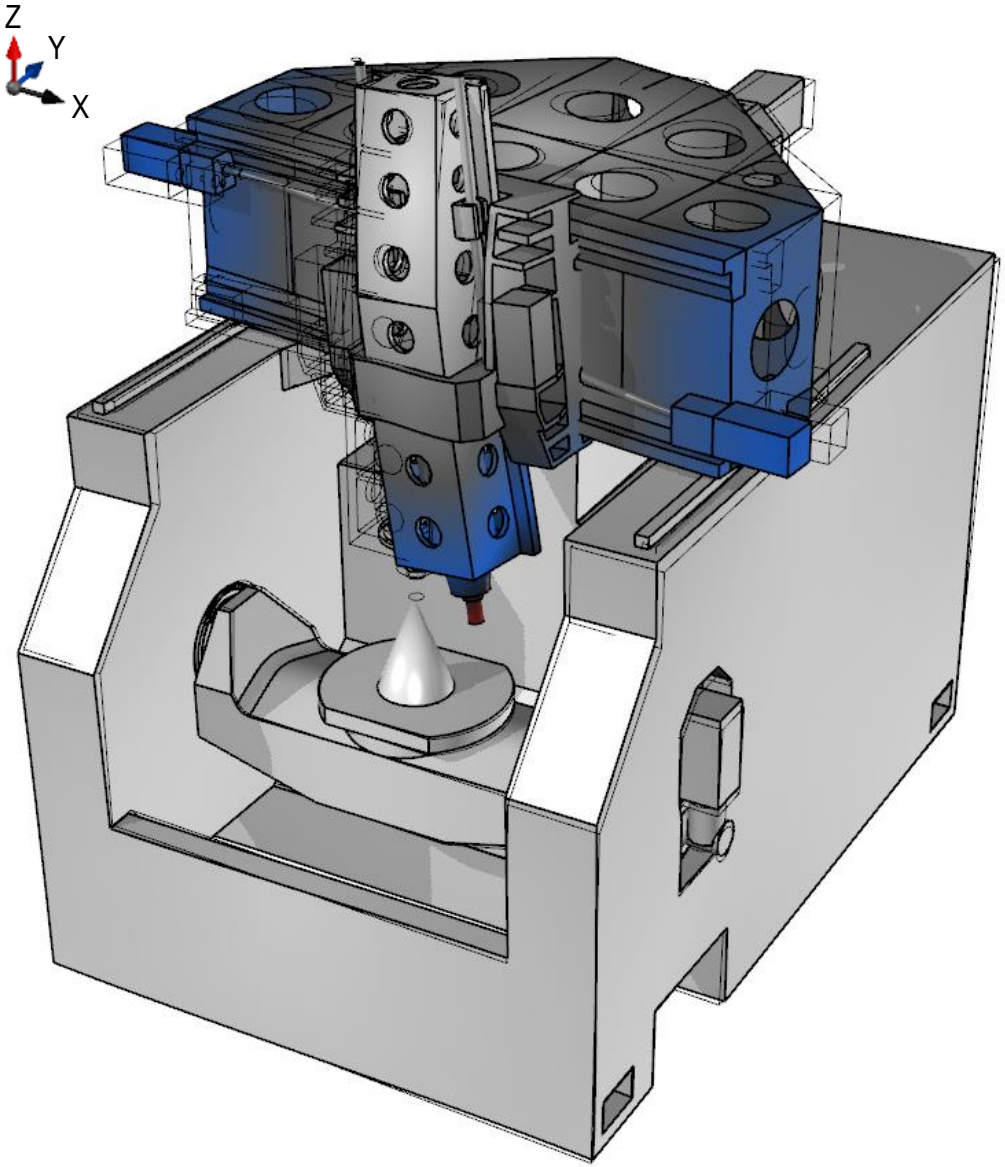
Schwingungsform bei 83 Hz



- Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

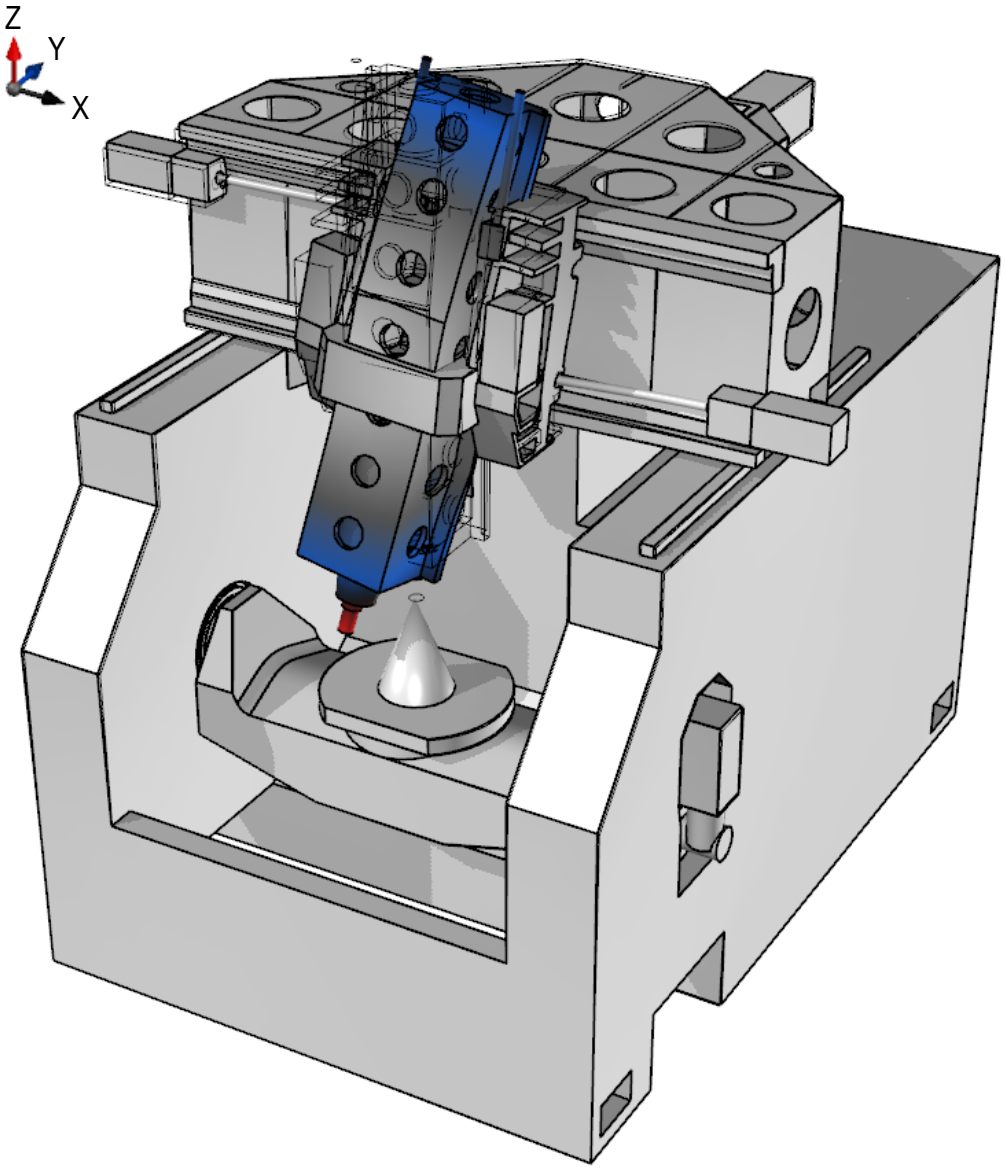
Schwingungsform bei 121 Hz



- Gieren des Y-Schlittens
- Schieben des X-Schlittens

© planlauf GmbH

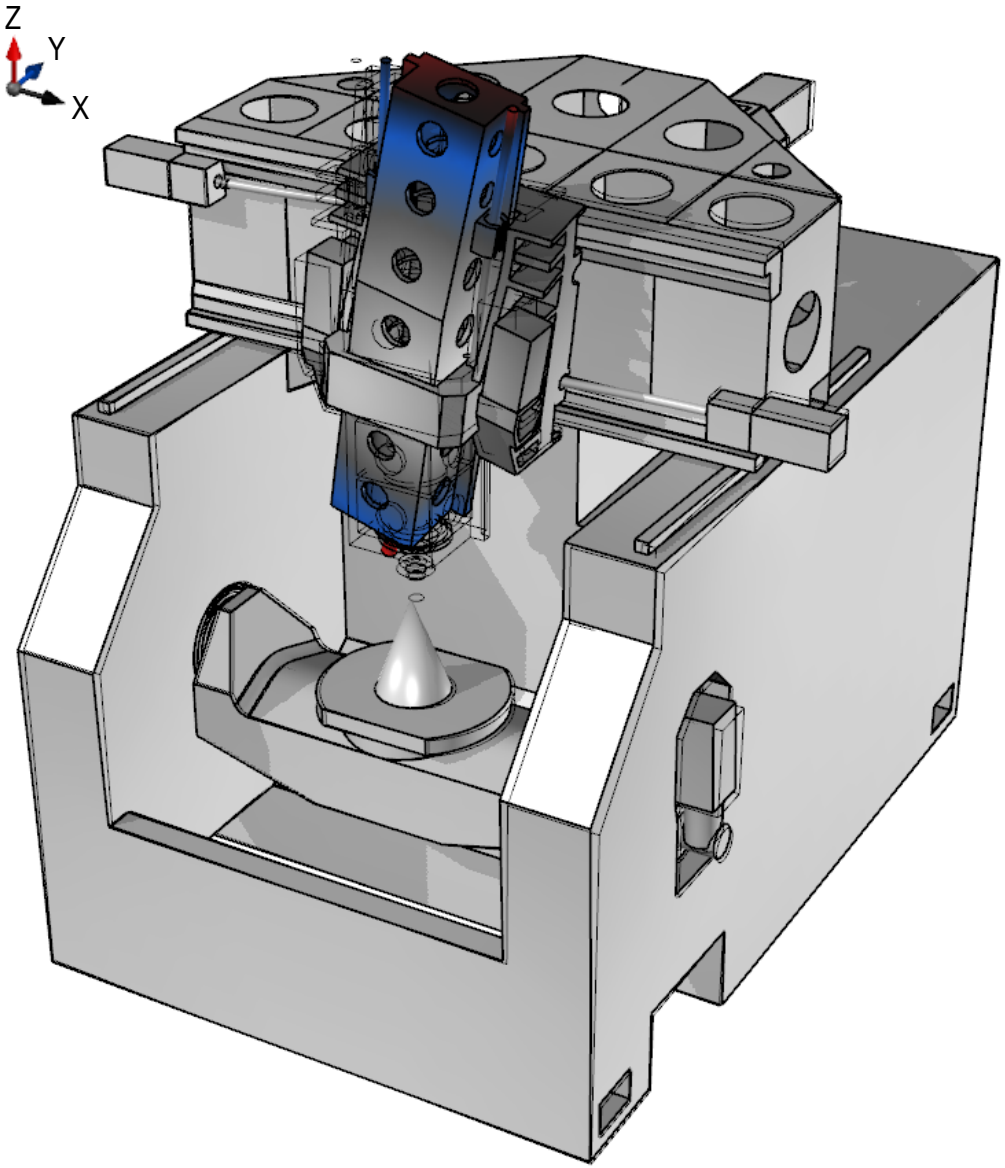
Schwingungsform bei 154 Hz



- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

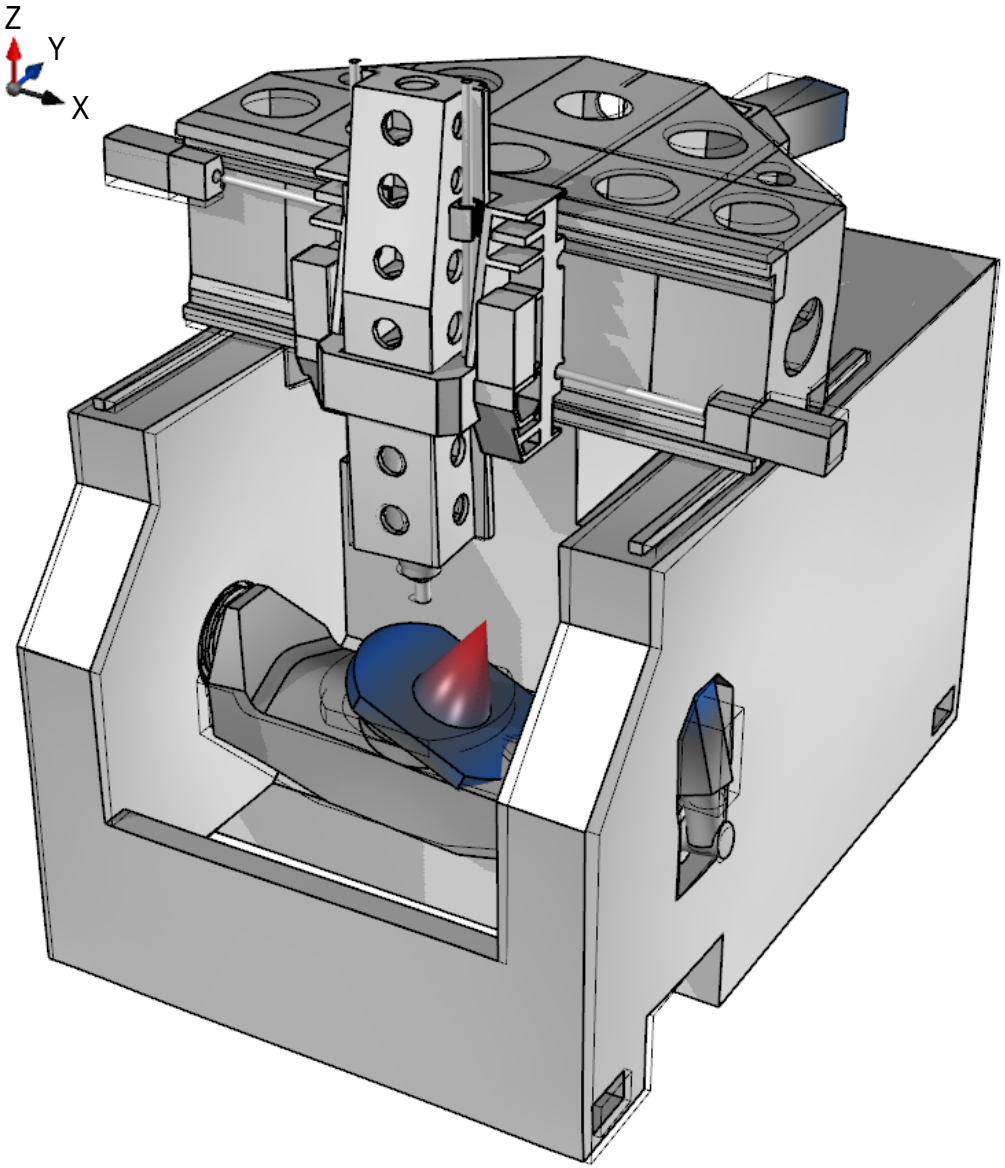
Schwingungsform bei 159 Hz



- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

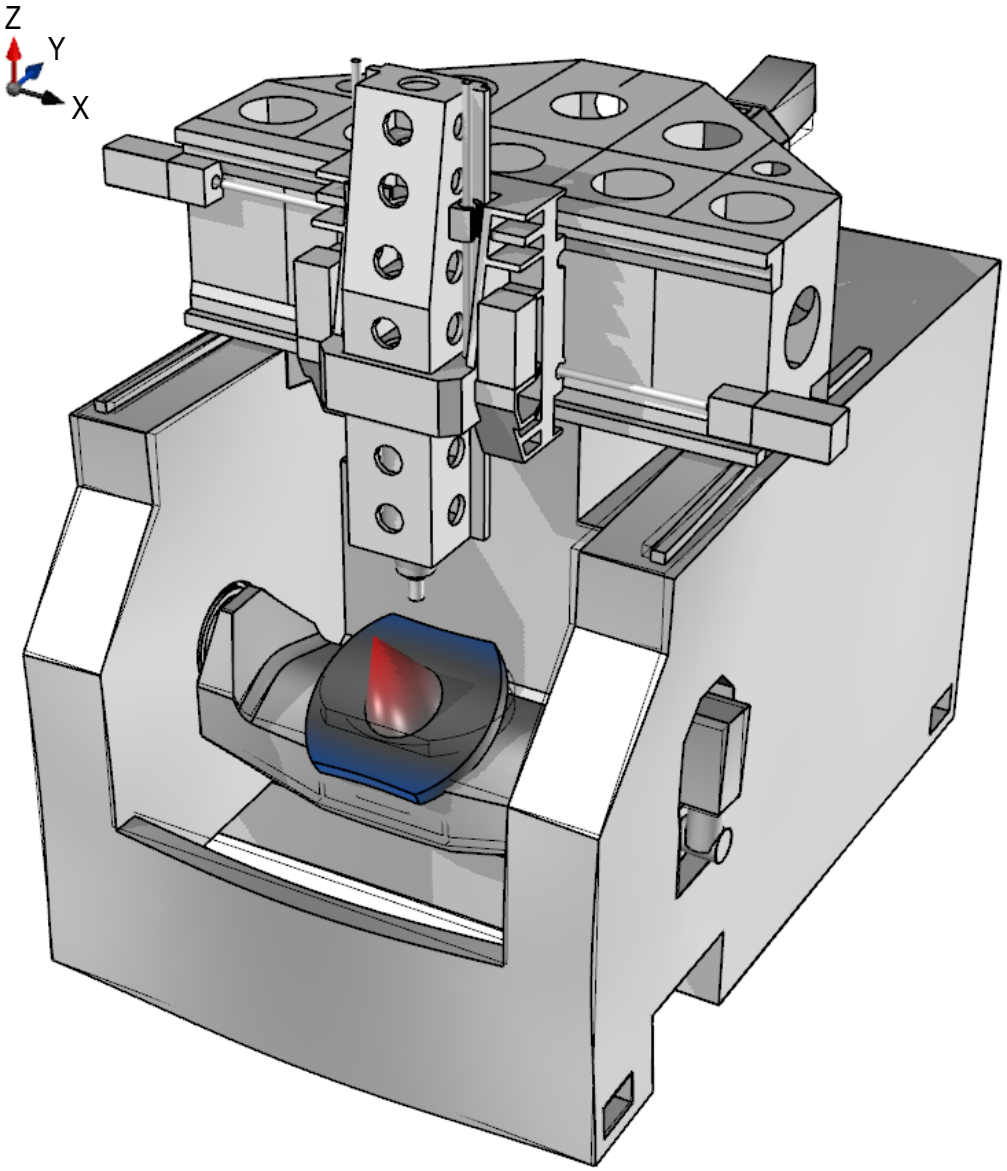
Schwingungsform bei 291 Hz



- Kippen des Tischs in X-Richtung

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 325 Hz



- Biegung und Torsion der Brücke
- Biegung des Betts im vorderen Bereich
- Kippen des Tischs in Y-Richtung

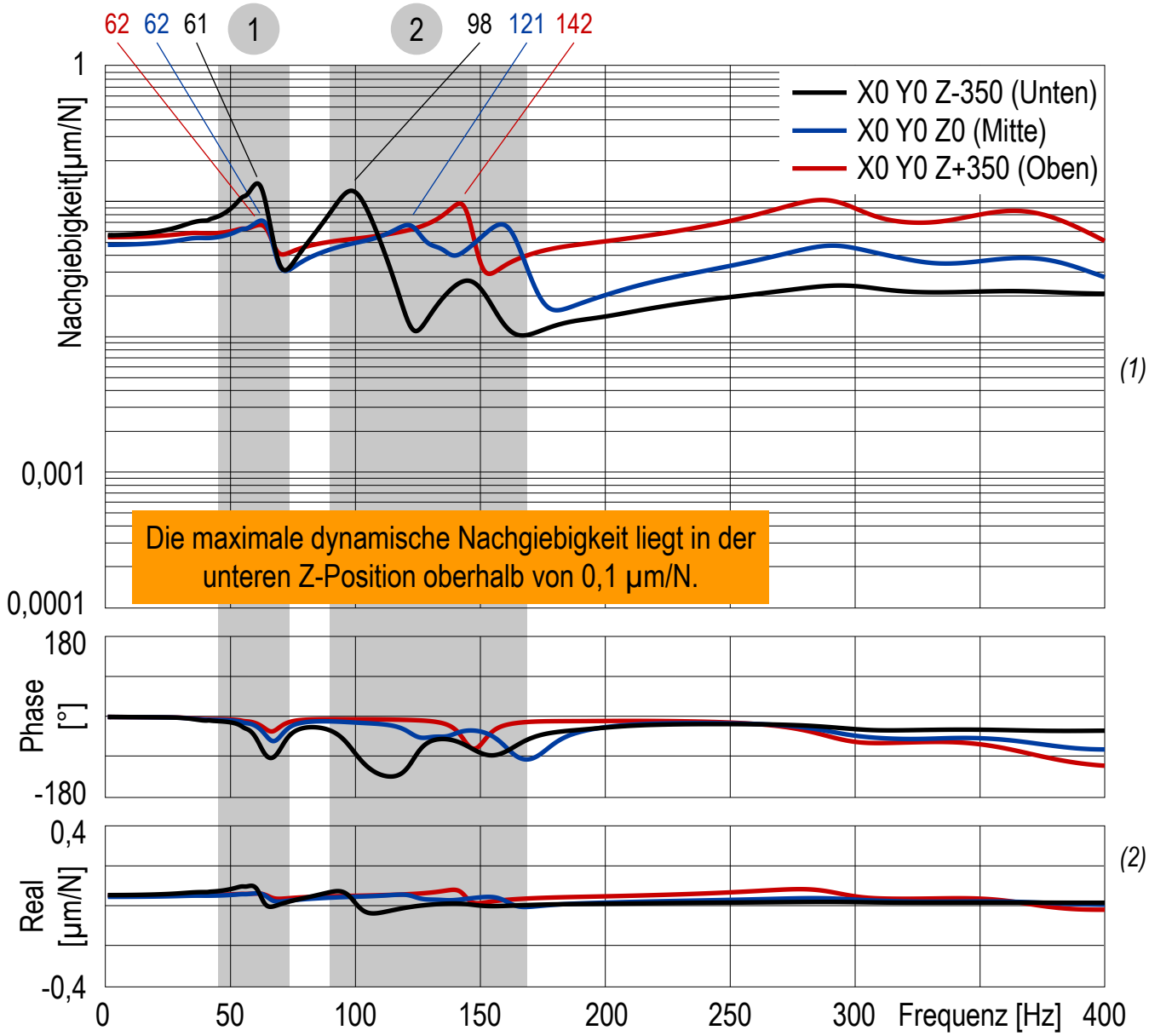
© planlauf GmbH

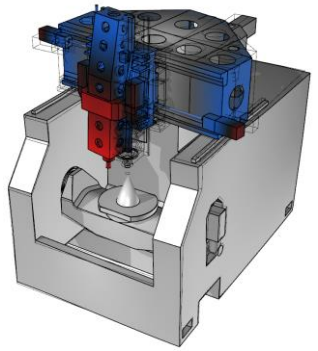
Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Variation der Z-Position*
- Zusammenfassung und Ausblick

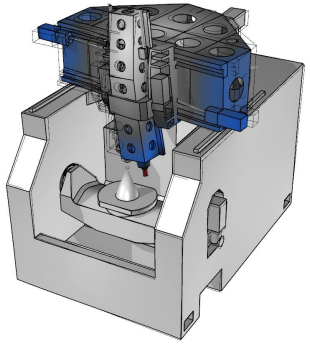
© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung





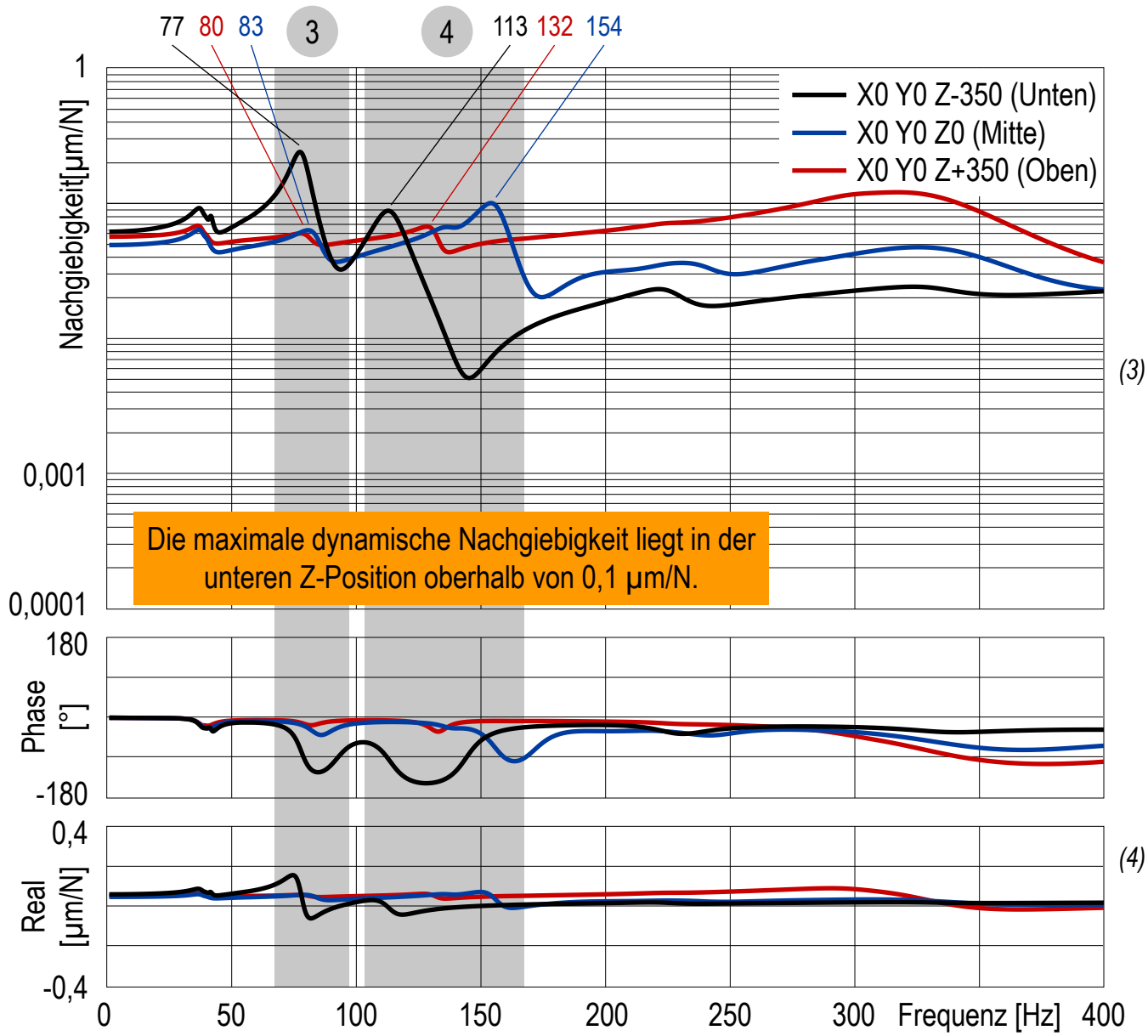
(1) Schwingungsform bei 62 Hz (Mitte)
- Schieben des X-Schlittens
- Gieren des Y-Schlittens

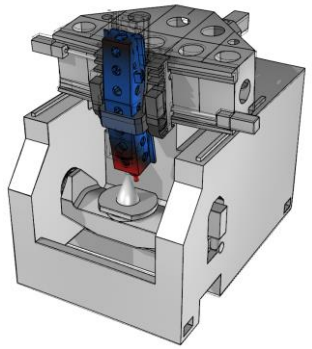


(2) Schwingungsform bei 121 Hz (Mitte)
- Gieren des Y-Schlittens
- Schieben des X-Schlittens

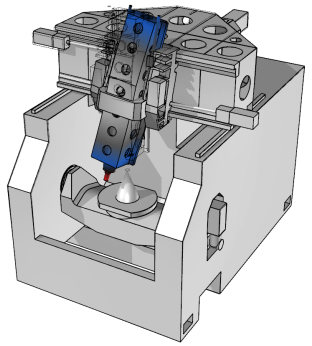
© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung





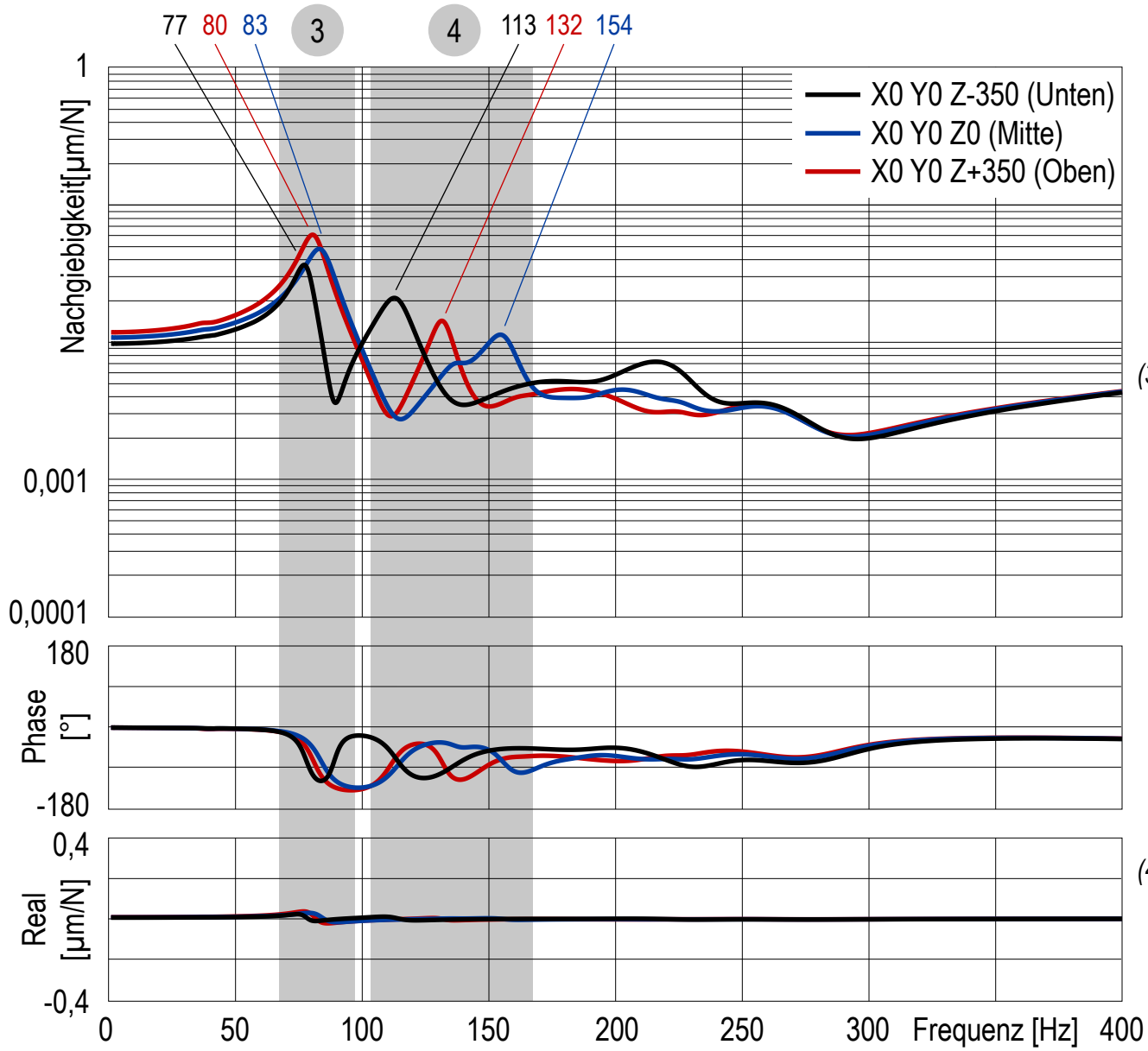
(3) Schwingungsform bei 83 Hz (Mitte)
- Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

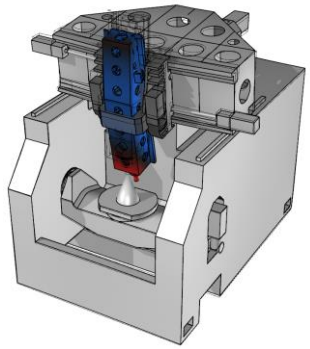


(4) Schwingungsform bei 154 Hz (Mitte)
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

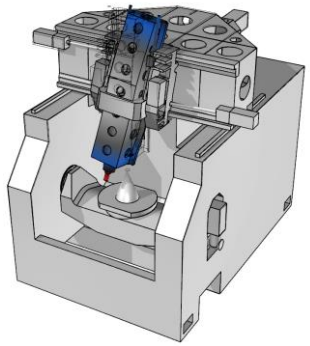
© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung





(3) Schwingungsform bei 83 Hz (Mitte)
- Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens



(4) Schwingungsform bei 154 Hz (Mitte)
- Nicken des Y-Schlittens
- Rollen des X-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

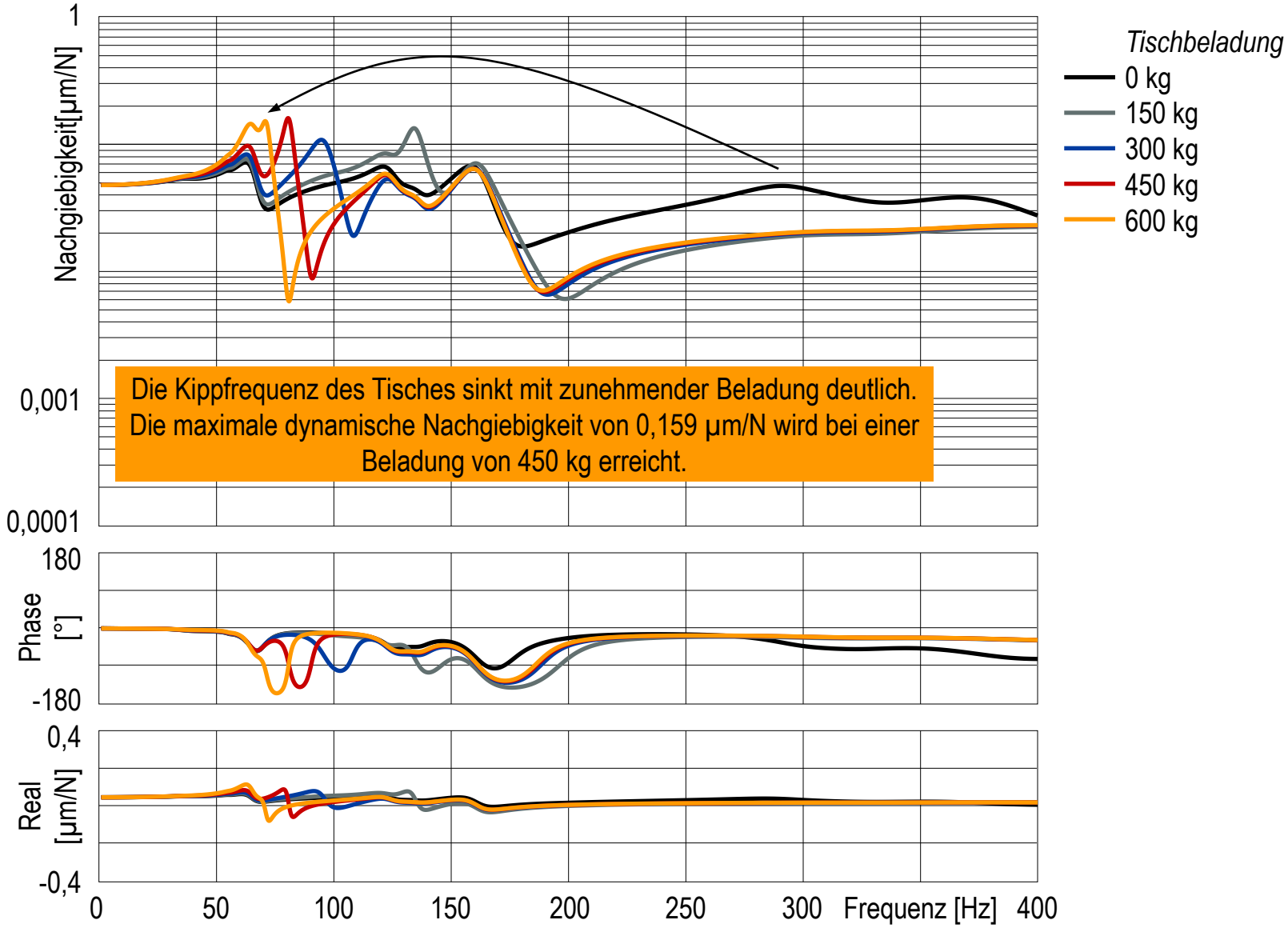
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Variation der Tischbeladung (Arbeitsraummitte)*
- Zusammenfassung und Ausblick

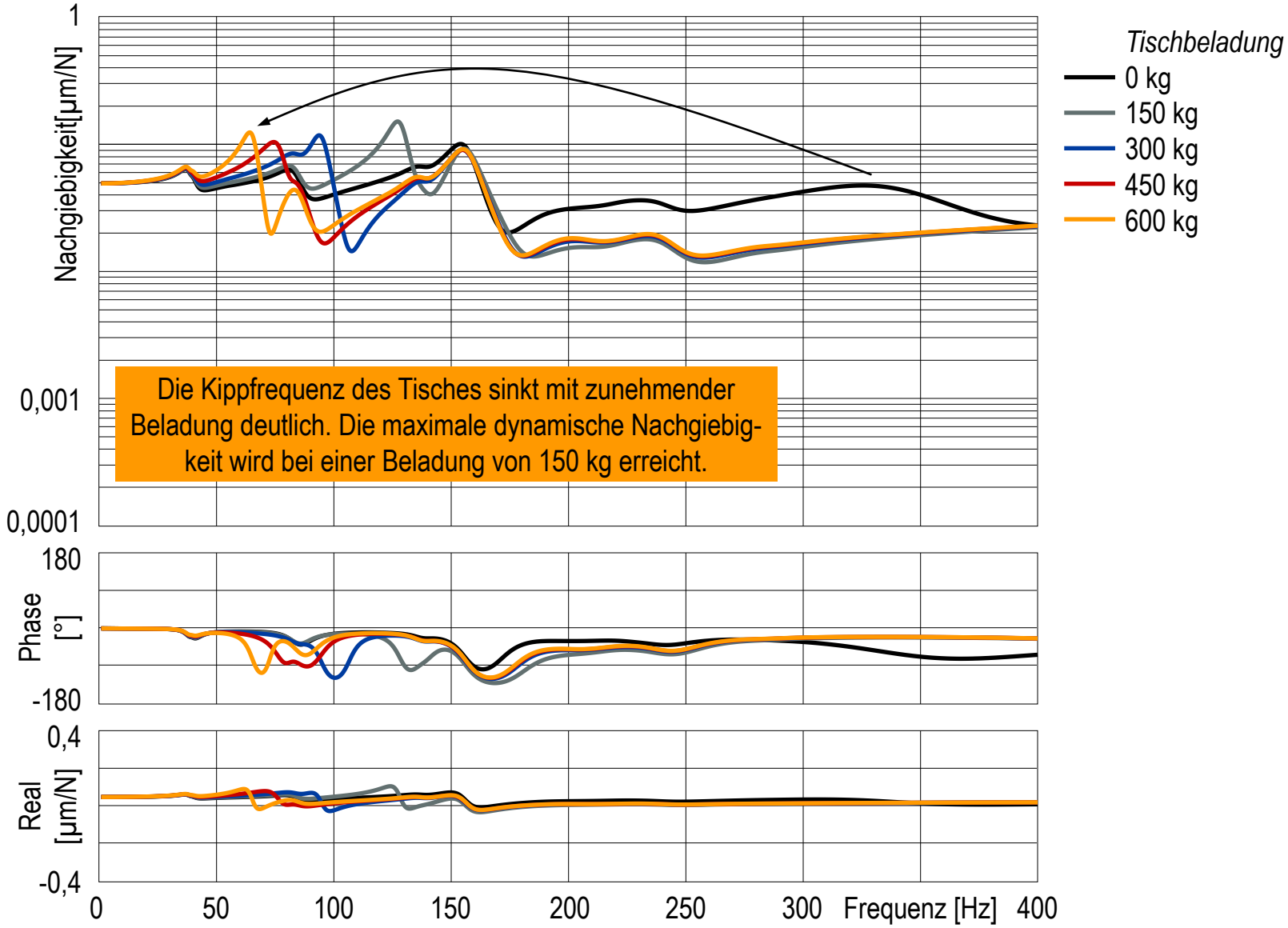
© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung



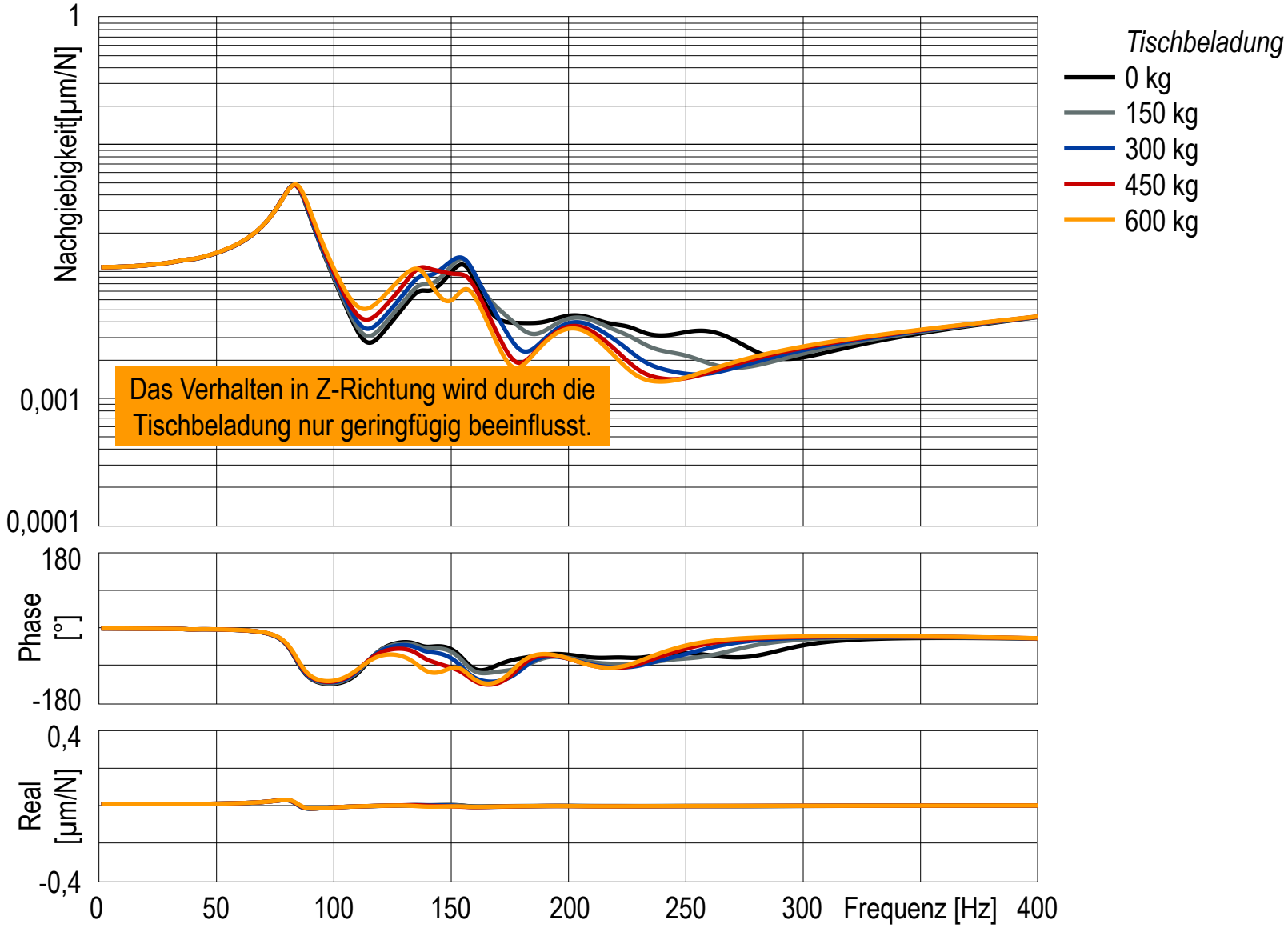
© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung



© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung



© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Ausblick

© planlauf GmbH

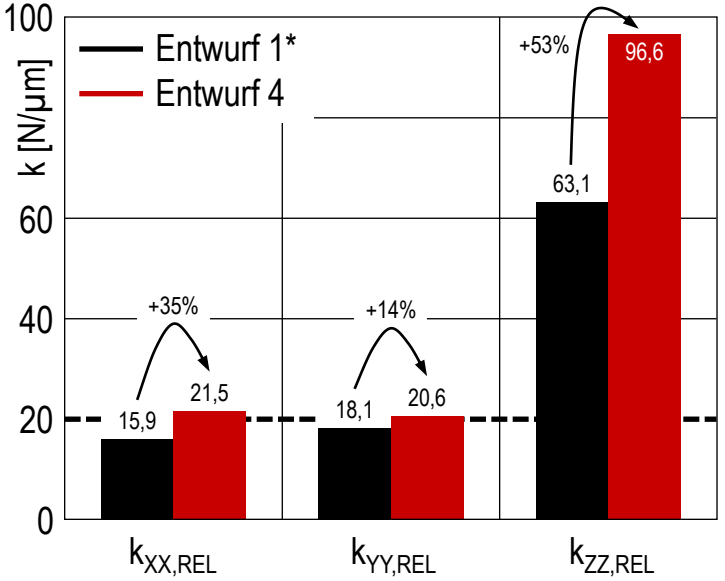
Zusammenfassung

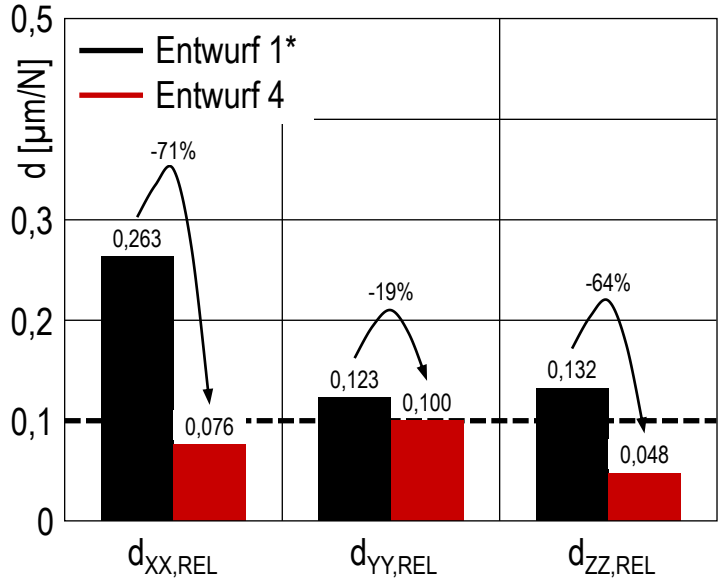
Statisches Verhalten

- Die **Zielsteifigkeit** von 20 N/µm relativ zwischen Werkzeug und Werkstück in der Arbeitsraummitte wird **von Entwurf 4 erreicht**.
- Die Verformungsanteile der einzelnen Komponenten sind vergleichsweise gleichmäßig verteilt. Der Anteil der Spindel an den radialen Steifigkeiten liegt bei ca. 40%. Deutlich höhere Steifigkeiten können somit nur durch eine **Änderung des Maschinenkonzepts und eine stärkere Spindel** erreicht werden.

Dynamisches Verhalten

- Die geforderte maximale **dynamische Nachgiebigkeit** in der Arbeitsraummitte von 0,1 µm/N **wird von Entwurf 4 erreicht**.
- Bei voll ausgefahrenem Z-Schlitten steigen die dynamischen Nachgiebigkeiten erwartungsgemäß an. In Y-Richtung wird ein Wert von 0,239 µm/N (Biegung des Z-Schlittens) erreicht. Dieser Wert ist zwar deutlich geringer als bei dem ersten Entwurf, könnte aber bei anspruchsvollen Fräsbearbeitungen in der untersten Z-Position (plattenförmige Werkstücke) unter Umständen zu einer instabilen Bearbeitung (Rattern) führen (Ausblick zu weiteren Verbesserungsmöglichkeiten s. nächste Folie).

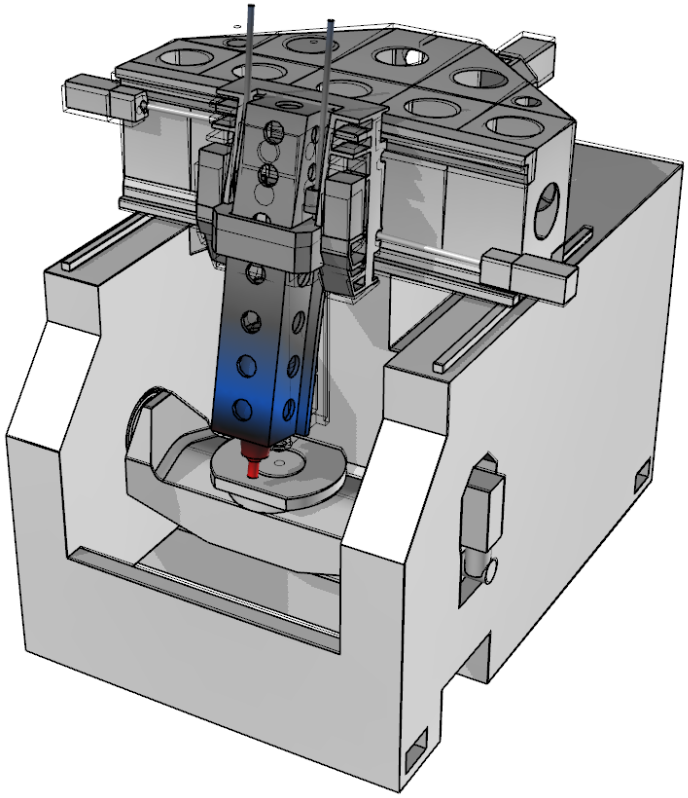




* Entwurf 1 und Entwurf 4 jeweils mit Klemmung der A-Achse

© planlauf GmbH

Ausblick: Weiteres Verbesserungspotenzial
Schwingungsform bei 77 Hz (Z-Position unten)



Schwingungsform bei 77 Hz (unten)

- In der ausgefahrenen Z-Position liegt die Biegeschwingung des Z-Schlittens bei 77 Hz. Die dynamische Nachgiebigkeit in Y-Richtung erreicht einen Wert von 0,239 µm/N.
- Für den Fall, dass eine anspruchsvolle Fräsbearbeitung auch bei voll ausgefahrenem Z-Schlitten erforderlich ist, könnte das dynamische Verhalten bei der kritischen Eigenfrequenz von 77 Hz durch folgende Maßnahmen verbessert werden:
  - Eine oder zwei zusätzliche Stützführungen an der Vorderseite des Z-Schlittens (Führungswagen im Bügel)
  - Hilfsmassendämpfer an der Unterseite des Z-Schlittens

© planlauf GmbH